TÉCNICA

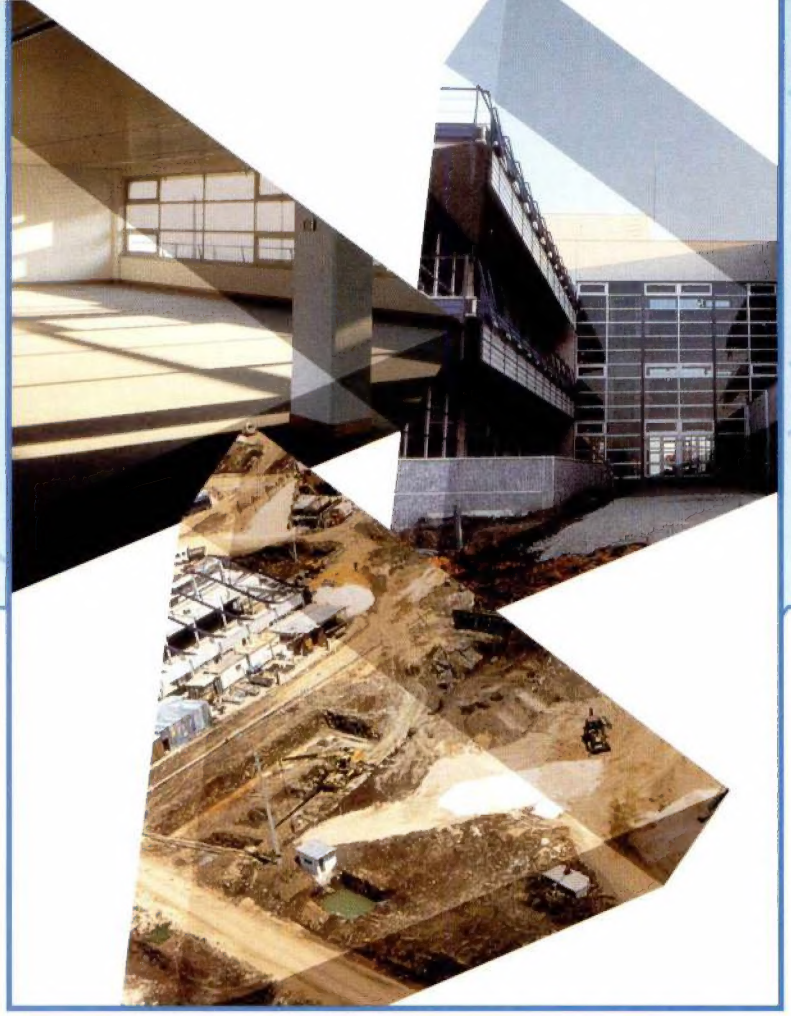
Revista de Engenharia

Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento

nº3/94 Dezembro 94

ISSN 0040-1714

pvp 400.00



TAGUSPARK
PARQUE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SITUAÇÃO ACTUAL

Rede Principal de Infraestruturas e Galeria Técnica Subterrânea (5 Km), já construída.

Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) em actividade desde Novembro 93.

Edifícios para instalação de PME (fase I), já construídos.

Edifício do Centro de Informática do BCP, já concluído.

Edifícios do Núcleo Central, Incubadora e PME (fase II), em fase adiantada de construção.

Infrastruturação do lote do INESC, já concluída.

Construção do Edifício do Centro de Informática da SIBS, prestes a iniciar-se.

Programa de Instalação do IST, já concluído.

Processo de candidatura e selecção de empresas para instalação no Taguspark, em curso.

TAGUSPARQUE, S.A. - Rua Cmdt. Cordeiro Castanheira, 41-2º • 2780 OEIRAS
Tel.: 441 69 31 • Fax: 441 69 36

dimensão 6 1994

03600042673

Instituto Superior Técnico
N.º 861
-BIBLIOTECA-

índice

Editorial 3

ARTIGO CONVIDADO

A Fusão Nuclear Controlada, o Programa Comunitário da Fusão e a Participação Portuguesa: J.A.C. Cabral, M.E. Manso e C.A.F. Varandas 5

COMUNICAÇÕES CIÊNTIFICAS

The Ideal Gas Equation P = αu and the Energy-Entropy Principle Rodrigo de Abreu 15

Electrochemical Properties of Polymer Electrolytes: L.P.S. Araújo and C.A.C. Sequeira 23

Redes Neuronais em Robótica: Pedro Quintas Aguiar e Luís Borges de Almeida 27

The Concepts of "Gorce" and "Gheat": What is the Problem with the First Law of Thermodymanics?: Rodrigo de Abreu 47

Os Sistemas de Vácuo de Limpeza da Câmara e de Injecção de gás do Tokamak ISTTOK: C.A.F. Varandas, C. Freitas, V. Prego, A. Soares, B. de Groot, F.M. Dias, B.B. Carvalho, J. Sousa, H. Fernandes, S. Magalhães e J.A.C. Cabral 55

Térmica de Edifícios: uma Solução Integrada para Distintos Utilizadores: J.M.S. Dionísio 61

Detecção de Solutos em Cromatografia Iónica – Detector Espectrofotométrico: J. Costa Pessoa 67

FICHA TÉCNICA:

TÉCNICA, Revista de Engenharia
Publicação trimestral - p.v.p. 400$00
distribuição gratuita aos sócios da AEIST e aos docentes do IST
ISSN 0040-1714
Depósito legal 85 271/94
Registo de Imprensa 101407

Propriedade
Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, P – 1000 Lisboa, Portugal
Contrib. N.º 501 055 606

Administração, Serviços Comerciais e Assinaturas
Av. Rovisco Pais, P - 1000 Lisboa, Portugal
Telef: 351 -1- 848 10 18/841 74 10
Fax: 351 -1- 847 40 14/849 92 47
Correio Electrónico – aeistdoc © eta.ist.utl.pl

Direcção
Director Científico: Manuel Abreu Faro
Director Executivo: Luís Lopes
Secretariado: Paula Carvalho

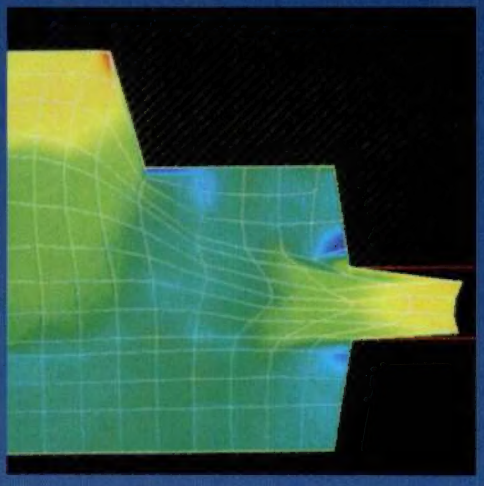
Concepção Gráfica
Traça Design
Praça da Alegria, 6 - 2.º Esq. – 1200 Lisboa
Telef: (01) 343 13 21
Fax: (01) 343 13 24

Publicidade
Dossier Comunicação e Imagens, Lda.
R. Eça de Queirós, 18 – 2.º Lisboa
Telef: (01) 355 92 94/5 – 353 73 21
Fax / Telef: (01) 353 73 16

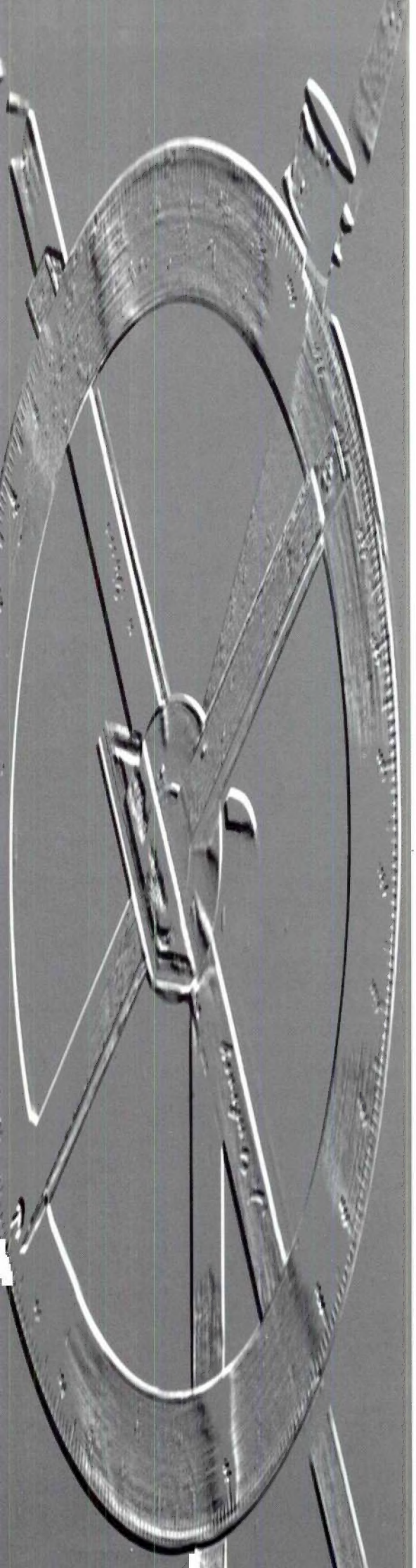
Execução Gráfica
Gráfica Maiadouro, S.A.
Rua Padre Luís Campos, 686
VERMOIM – Apart. 6 – 4471 Maia Codex
Telef. (02) 948 02 45/88 05/88 30
Fax: (02) 948 77 07
Tiragem: 5000 ex.

Apoio
Conselho Directivo do Instituto Superior Técnico

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



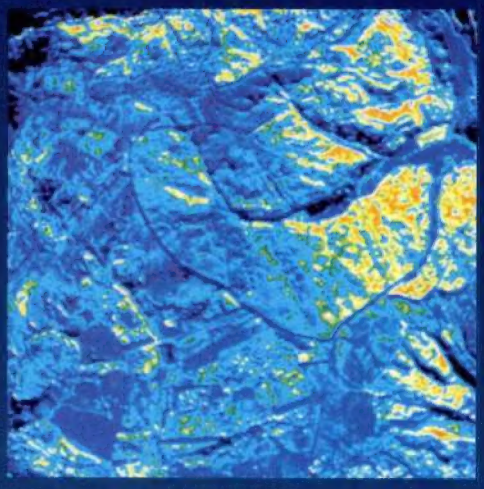
UMA NOVA ETAPA NA COMUNIDADE EUROPEIA

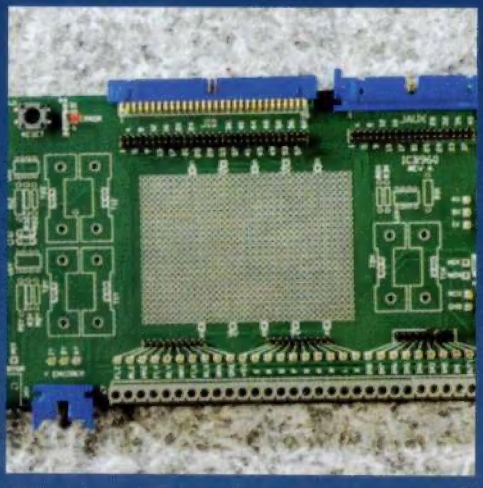


EDITORIAL

Em 1994 a TÉCNICA publicou
quatro números.
Um deles, o número único de 1993.
Disto se afere o novo ritmo, conseguido.
Um desses números foi em memória de Duarte Pacheco
tal como nos 75 anos do I.S.T. se salientou Bensaúde.
História da Escola e de Quem nela se empenhou
e construiu. Justo que assim é e foi.
Mas
a vocação primeira da Técnica
é a investigação e desenvolvimento.
Assim se volta à sua estrutura característica:
Artigos Convidados, Comunicações Científicas,
Notas sobre Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento.
Rubrica esta, deserta, sem originais. Porquê?
De um esforço grande,
Ajudado e encorajado, como sempre,
pelo Conselho Directivo do Instituto Superior Técnico,
esperamos
que este espaço se preencha plenamente
com notas, numerosas e diversas.
Sintéticas, densas, rigorosas,
permitindo,
comparar e medir avanços,
sentir e avaliar o que é novo.
Uma página apenas, duas no máximo,
para que o noticiário seja rico e vário.
Respondemos, julgamos,
a um desejo que pressentimos.
Nesse espírito e para que assim seja,
nos despedimos neste número de alguns artigos
já recebidos
sem dúvida interessantes, mas demasiado extensos
relativamente à finalidade que se visa:
maior e nova diversidade,
fonte de maior interesse e colaboração.

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO





OS PROGRAMAS DA COMUNIDADE EUROPEIA

A FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA, O PROGRAMA COMUNITÁRIO DE FUSÃO E A PARTICIPAÇÃO PORTUGUESA

J.A.C. Cabral, M.E. Manso e C.A.F. Varandas
Associação EURATOM/IST, Centro de Fusão Nuclear

1. INTRODUÇÃO

Existem duas vias bem conhecidas para a obtenção de energia por reacções nucleares: a da fissão de um elemento pesado, como o Urânio ou o Plutónio, e a da fusão de dois elementos leves, como os isótopos do Hidrogénio. É hoje mundialmente reconhecido o enorme potencial da fusão nuclear controlada, como fonte de energia economicamente competitiva, tecnicamente segura, virtualmente inesgotável e respeitadora do meio ambiente.

Um dos méritos da fusão nuclear consiste em queimar combustíveis abundantes (deutério e lítio) e utilizar tecnologias muito avançadas, que permitem que qualquer anomalia verificada no funcionamento dos reactores leve imediatamente à sua paragem. Por outro lado, a produção de energia por fusão nuclear não origina poluição atmosférica, não provoca chuvas ácidas nem contribui para o efeito de estufa. A quantidade de trítio envolvida nestes reactores é muito pequena e não causa problemas, dada a sua pequena semi-vida. A radioactividade da estrutura interna do reactor, causada pelo bombardeamento pelos neutrões produzidos nas reacções de fusão, pode ser minimizada pela escolha selectiva de materiais de baixa activação, não sendo necessário armazenar, por tempos de escala geológica, resíduos radioactivos.

Com este artigo pretende-se dar uma breve perspectiva da investigação internacional em fusão nuclear. Uma maior relevância é dada aos aspectos relacionados com o Programa Comunitário de Fusão, fazendo-se salientar a contribuição portuguesa. Dentro deste programa, um ênfase especial é dado ao confinamento magnético e em particular à investigação em "tokamaks".

2. AS REACÇÕES DE FUSÃO NUCLEAR

As reacções mais adequadas à produção de energia por fusão nuclear, são as que envolvem dois isótopos do hidrogénio, ou um núcleo de deutério e outro de ^{3}He, gás raro que existe em abundância à superfície da Lua.

$$D + D \rightarrow T\,(1.01\ \text{MeV}) + p\,(3.03\ \text{MeV}) \quad (1)$$
$$D + D \rightarrow {}^3He\,(0.82\ \text{MeV}) + n\,(2.45\ \text{MeV}) \quad (2)$$
$$D + T \rightarrow {}^4He\,(3.52\ \text{MeV}) + n\,(14.06\ \text{MeV}) \quad (3)$$
$$D + {}^3He \rightarrow {}^4He\,(3.67\ \text{MeV}) + p\,(14.67\ \text{MeV}) \quad (4)$$

A reacção que apresenta a maior secção eficaz, não só às temperaturas actualmente atingidas mas também até aos 400 keV, é a que envolve os iões de deutério e de trítio. Esta reacção apresenta um grande saldo energético, transportado maioritariamente pelo neutrão de 14 MeV. O deutério existe em

abundância na água do mar (1 gr de deutério em 50 litros de água) mas o trítio tem que ser obtido, por exemplo a partir do lítio, metal leve abundante nos granitos, (3g de trítio por cada 6-7 g de lítio), através das reacções

$$^{7}Li + n \rightarrow T + {}^{4}He + n - 2.5\ MeV \qquad (5)$$
$$^{6}Li + n \rightarrow T + {}^{4}He + 4.8\ MeV \qquad (6)$$

A inclusão de uma manta de lítio a forrar a parede interna do reactor permitirá obter o trítio directamente a partir dos próprios neutrões da reacção (3) podendo, em conjunto, esta reacção e a (6) serem escritas na seguinte forma sintética

$$D + {}^{6}Li \rightarrow 2\ {}^{4}He + energia \qquad (7)$$

A níveis actuais de consumo, as jazidas de lítio conhecidas poderiam manter os reactores de fusão a trabalhar por cerca de um milhar de anos.

Se o avanço da ciência e da tecnologia vier a permitir compensar a reduzida secção eficaz das reacções (1) e (2) às temperaturas actualmente atingidas, poderemos ter reactores a queimar apenas deutério, obtendo-se neste caso uma fonte de energia praticamente inesgotável.

3. SOLUÇÕES PARA A OBTENÇÃO DA ENERGIA DE FUSÃO

Para que dois núcleos leves se possam fundir é necessário que consigam aproximar-se suficientemente, contrariando a força de Coulomb que os repele. A elevação da temperatura iónica (T_i) para valores adequados (10-20 keV para a mistura D-T), fornece a uma larga percentagem dos iões uma energia cinética suficiente para vencerem a barreira electrostática e se fundirem com o ião com que colidem. Para que se possa gerar uma potência significativa é necessário que a densidade do plasma (n_e) seja elevada e que as perdas de potência, por transporte ou por radiação, sejam limitadas, isto é que se confine o plasma termonuclear. O confinamento pode ser de dois tipos: magnético ou inercial.

3.1. O confinamento magnético

No confinamento magnético, as partículas carregadas do plasma, iões e electrões, são isoladas das paredes da câmara, através de complicados sistemas de campos magnéticos, devido ao facto de aquelas partículas se moverem em trajectórias aproximadamente helicoidais, ao longo das linhas de força do campo magnético, apenas difundindo muito lentamente através delas. Utilizam o confinamento magnético algumas máquinas lineares, como por exemplo a "Reversed Field Pinch" e outras toroidais, como o "Stellarator" e o "Tokamak".

A capacidade de armazenar as partículas carregadas e de evitar as perdas de potência pode ser medida pelo valor do chamado tempo de confinamento da energia (τ) , isto é, pela relação entre a energia cinética total do plasma e a potência externa aplicada para a manter, ou por outras palavras, a escala de tempo característica do arrefecimento do plasma, quando se desligam as suas fontes de potência. Num reactor de fusão, os valores de T_i, n_e e τ devem obedecer ao critério de Lawson expresso por

$$n_e\ T_i\ \tau > 5 \times 10^{21}\ m^{-3}\ s\ keV \qquad (8)$$

com valores típicos de $T_i \sim$ 10-20 keV, $n_e \sim 2\text{-}3 \times 10^{20}\ m^{-3}$ e $\tau \sim$1-2 s.

3.1.1. *O "tokamak"*

Das várias configurações magnéticas, a do "tokamak" é a que assume maior importância no Programa Comunitário de Fusão (PCF). Num "tokamak" exis-

BIBLIOTECA I.S.T.

tem três tipos de campo magnético: (i) – o toroidal, produzido pelas bobines transversais; (ii) – o poloidal interno, criado pela corrente toroidal induzida no plasma e (iii) – o vertical e o horizontal, gerados por bobines toroidais externas, e destinados a manter o equilíbrio da coluna de plasma. Com este conjunto de campos magnéticos e com a utilização de limitadores ou de diversores, consegue-se manter o plasma quente isolado das paredes do "tokamak". O plasma é produzido por uma variação rápida da tensão aplicada ao primário de um transformador de núcleo de ferro, do qual o anel de plasma de pré-ionização constitui o secundário de uma só espira. Os grandes "tokamaks" mundiais existentes actualmente são: JET (Europeu), TFTR (EUA), JT6O-U (Japão), TORE SUPRA (França), T15 (Rússia), DIII-D (EUA), ASDEX-U (Alemanha) e FTU (Itália).

Para se conseguir obter energia significativa num reactor nuclear (Fig. 1) é necessário realizar uma série de etapas, de entre as quais se salientam:

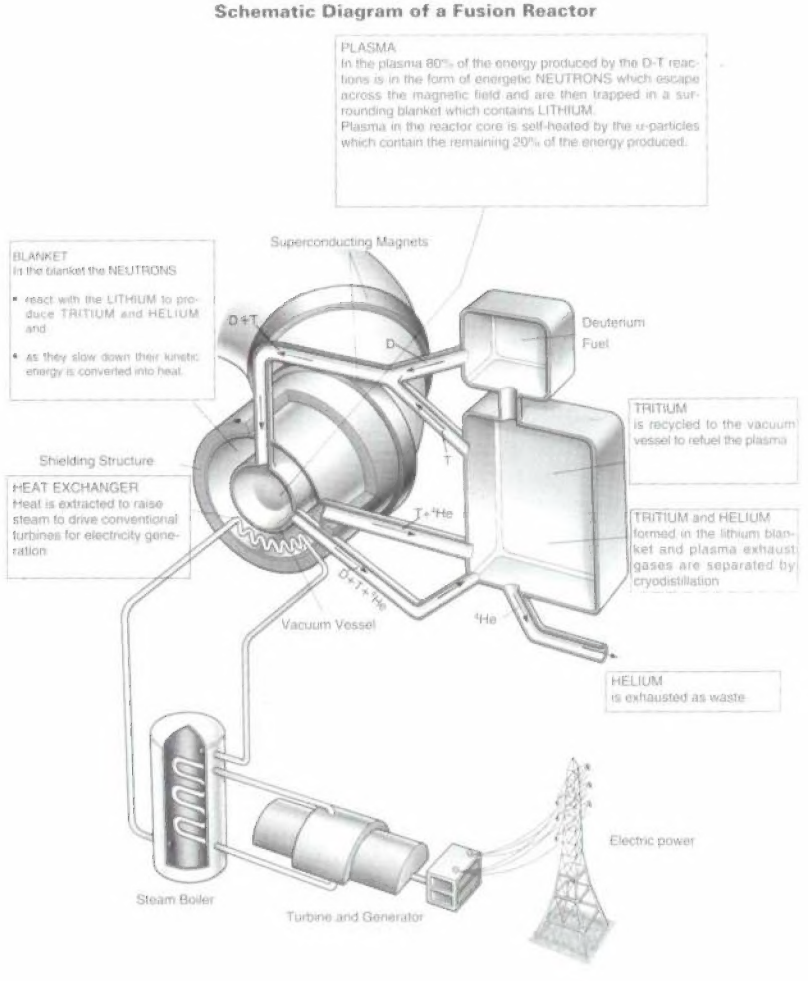


Fig. 1 – Desenho esquemático de um reactor de fusão nuclear.

(i) – obter um alto grau de vazio no interior do "tokamak"; (ii) – injectar e pré-ionizar o gás neutro; (iii) – aumentar a densidade do plasma pelo aumento gradual da corrente induzida no "tokamak", provocando o seu aquecimento ohmico (efeito de Joule); (iv) – confinar o plasma quente mediante o uso de limitadores metálicos ou de diversores magnéticos; (v) – desenvolver métodos de aquecimento adicional do plasma, por injecção de potência de RF ou de feixes de neutros de grande energia; (vi) – eliminar as instabilida-

des do plasma, ("kink", "sausage", "MHD", "sawtooth", "snakes", "monsters", filamentação, etc) em especial as que levam à diminuição ou perda do confinamento (disrupções); (vii) – aumentar o tempo de confinamento da energia; (viii) – atingir parâmetros que satisfaçam o critério de Lawson; (ix) – remover eficazmente as chamadas "cinzas de Hélio", produto da fusão da mistura D-T, mas não tão depressa que as partículas α se vejam impedidas de aquecer o plasma; (x) – controlar o fluxo de partículas e de energia para os limitadores ou para as placas colectoras dos diversores magnéticos, de modo a evitar o seu sobreaquecimento e destruição; (xi) – realimentar o "tokamak" para se manterem descargas de longa duração através, por exemplo, de injecção de "pellets" de D ou de D-T em estado sólido; (xii) – atingir a chamada ignição, isto é a fase em que o aquecimento provocado pelas particulas α é suficiente para manter a temperatura do plasma; (xiii) – dimensionar as mantas contendo lítio que rodeiam o plasma e que se destinam a absorver os neutrões rápidos, gerando trítio e convertendo a sua energia cinética em calor; (xiv) – aproveitar esse calor para o produção de vapor para as turbinas de um gerador de electricidade convencional; (xv) – controlar a radioactividade das paredes do "tokamak" de modo a que não ultrapasse limites razoáveis, pela utilização de materiais de baixa activação; (xvi) – desenvolver sistemas de controle à distância do funcionamento dos reactores; (xvii) – estudar a utilização da robótica para as operações de modificação e de reparação de componentes no interior da máquina em ambientes radiactivos; (xviii) – estudar o impacto provocado pelos reactores de fusão no meio ambiente e estabelecer regras que conduzam à segurança da sua operação.

O tempo de confinamento da energia, τ, aumenta com os raios maior e menor do tokamak. Daí a necessidade de termos máquinas cada vez maiores. De facto, o que distingue um grande "tokamak" (JET) de um pequeno (ISTTOK) não é o ganho de T_i (um factor 5) nem o de n_e (um factor 10) mas sim o de τ (factor 2000). Daí que a construção de grandes máquinas não seja devida à megalomania dos cientistas da fusão, mas sim à absoluta necessidade de se aumentar τ de modo a se satisfazer o critério de Lawson. Trata-se de uma solução onerosa, devido aos altos custos associados à criação de campos nagnéticos muito intensos (5-7 T) em volumes da ordem das centenas de metros cúbicos.

O progresso da investigação em fusão nuclear por tokamaks pode ser apreciado pelo rápido decrescimento da relação entre o valor do produto de fusão (n_e T_i τ) requerido pelo critério de Lawson e o maior valor desse produto obtido num determinado ano. Esta relação era de: 25.000 em 1970, 700 em 1980, 100 em 1983, 20 em 1988, 10 em 1989 e 6 em 1991. A ignição está prevista para o ano de 2005.

3.1.2. *O "stellarator"*

O "stellarator" moderno é uma máquina toroidal em que a helicidade das linhas de força do campo magnético principal, em vez de ser obtida pelo campo poloidal interno produzido pela corrente toroidal, como no "tokamak", resulta directamente do campo produzido pelas bobines do seu complicado solenoide principal. A grande vantagem do "stellarator" é portanto a de não necessitar de uma corrente toroidal da ordem dos MA para o seu funcionamento. Os "stellarators" apresentam um perfil radial de densidade mais plano que os dos "tokamaks", que são geralmente bastante picados. Por isso mesmo, os "stellarators" têm dificuldade em se libertarem das "cinzas de Hélio", por ausência da instabilidade de "sawtooth", que nos tokamaks expele os iões do centro do plasma para a periferia. A investigação em "stellarators" é uma linha que o PCF conduz com grande interesse, estando prevista a construção de um grande "stellarator" na Alemanha, o "Wendelstein-7X", projecto que se espera venha a ser multinacional e no qual a Associação Portuguesa foi convidada a colaborar.

3.2. O confinamento inercial

A fusão por confinamento inercial tem por base o facto de os iões se movimentarem muito lentamente, em escalas de tempo associadas à injecção de energia por meio de impulsos ultracurtos (ns) de lasers de grande potência. Esta tecnologia baseia-se no disparar simultâneo de vários lasers, de modo a serem focados sobre alvos geralmente esféricos e de reduzidas dimensões contendo D ou D-T em estado sólido. Estes alvos implodem sob a pressão da radiação e, como resultado, os átomos de deutério e de trítio ionizam-se e aumentam a sua densidade e temperatura, originando reacções de fusão. A fusão por laser tem sido investigada principalmente pelos Estados Unidos, país onde os resultados experimentais foram durante largos anos considerados matéria classificada, dada a importância geo-estratégica dos lasers de grande potência. Tem também sido usados feixes de partículas de alta energia em substituição dos de laser.

4. O PROGRAMA COMUNITÁRIO DE FUSÃO

O Programa Comunitário de Fusão é um programa a longo prazo, que envolve os doze paises da União Europeia, a Suiça e a Suécia. O seu objectivo a longo termo é a construção de protótipos de reactores a fusão nuclear, que satisfaçam os mais rigorosos critérios relacionados com a segurança e a defesa do meio ambiente, tendo em vista a produção da enorme quantidade de energia necessária ao desenvolvimento da sociedade mundial no próximo milénio. Este programa privilegia a investigação em "tokamaks", embora suporte também importante actividade no domínio dos "stellarators", e mantenha o acompanhamento activo do progresso da fusão inercial.

Para dar continuidade ao trabalho já realizado no JET, o PCF prevê a construção de um reactor experimental na configuração "tokamak" designado por "Next Step", o qual, neste momento, se pode identificar com o ITER ("International Thermonuclear Experimental Reactor") ou ainda com o NET ("Next European Torus") caso as negociações em curso do projecto ITER se vierem a tornar dificieis ou mesmo impossíveis.

Os objectivos mais importantes do PCF são: (i) – dar apoio prioritário ao "tokamak" ITER, cuja localização se pretende venha a ser na Europa; (ii) – continuar a apoiar o programa de investigação do JET; (iii) – incentivar a investigação em máquinas especializadas de menor porte, com o objectivo de se explorar o espaço dos parâmetros mais adequado às grandes experiências do futuro e de estudar conceitos alternativos de confinamento magnético; (iv) – apoiar a formação de uma nova geração de físicos, investigadores e técnicos, no domínio dos plasmas termonucleares, através de uma ligação cada vez maior às Universidades; (v) – preparar a indústria europeia para os desafios que a construção dos futuros reactores de fusão irá lançar; (vi) – estudar os aspectos ligados à segurança e à protecção do meio ambiente, em cenários associados à geração de grandes quantidades de energia por fusão nuclear.

A investigação comunitária em fusão nuclear envolve verbas anuais da ordem dos 450 MEcus, dos quais cerca de 200 MEcus são provenientes da Comissão.

4.1. O projecto JET

O JET ("Joint European Torus") (Fig. 2) é o maior e o mais potente "tokamak" do mundo, o que coloca a Europa à frente da investigação mundial da fusão por confinamento magnético. Foi concebido, desde o início, como máquina intermédia que iria facilitar a construção do "Next Step". O seu financiamento é feito pela Comissão da União Europeia (80%), pela "United Kingdom Atomic Energy Authority" (10%) e pelas diversas Associações com a Eurátomo (10%), entre as quais se encontra a Associação portuguesa.

TÉCNICA nº 3 DEZ 94

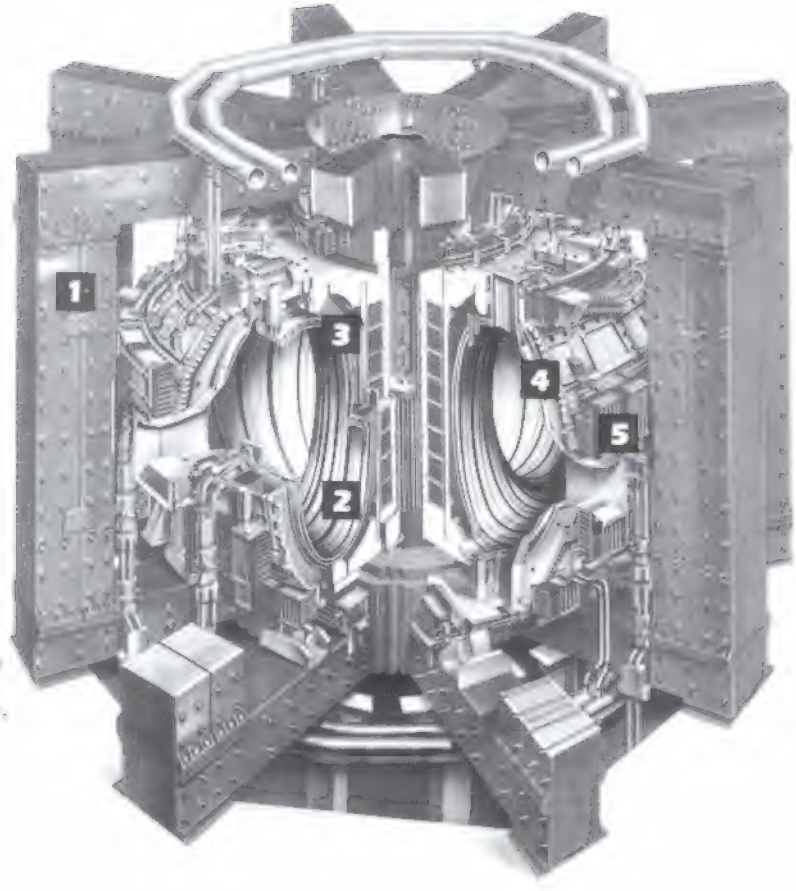


Fig. 2 – Esquema do "tokamak" JET. 1 – núcleo de ferro do transformador; 2 – câmara do "tokamak"; 3 – bobine do campo magnético toroidal; 4 – ligação entre dois "oitavos" da câmara de vácuo; 5 – bobine do campo poloidal externo.

O programa científico e tecnológico do JET tem as seguintes finalidades principais: (i) – estudar as leis de escala do comportamento do plasma, quando os seus parâmetros se forem gradualmente aproximando dos requeridos por um reactor de fusão; (ii) – estudar a interacção entre o plasma e a parede do "tokamak"; (iii) – estudar métodos de aquecimento adicional do plasma; (iv) – estudar a produção e o confinamento das partículas α geradas pelas reacções de fusão e o problema da sua remoção do plasma central; (v) – abordar os aspectos tecnológicos do manuseamento do trítio e da manutenção e reparação da experiência por controle remoto.

O primeiro plasma do JET foi produzido em 1983. O seu programa experimental contemplou já a introdução de sistemas de aquecimento adicional por RF em 1985 e a injecção de feixes de partículas neutras de alta energia (140 keV) em 1988. O JET fez em 1991 a primeira descarga com mistura D-T tendo-se atingido uma potência de fusão nuclear de 1.7 MW de pico, durante cerca de 2 s, e gerado uma energia de 2 MJ. A escolha de uma baixa percentagem de trítio (10%) permitiu uma baixa activação das paredes da máquina, que assim se encontra hoje novamente em operação. Esta

experiência pioneira com mistura de D-T foi depois repetida no TFTR de Princeton, em finais de 1993 (50% T), gerando-se uma potência de fusão de cerca de 6.4 MW durante 1 s. Os valores máximos dos parâmetros já atingidos, individualmente, no JET são: T_i = 300 milhões de °C, n_e =4x10^{20} m^{-3}, τ = 1.8 s. Se estes três valores fossem obtidos simultaneamente, numa mesma descarga, estava satisfeito o critério de Lawson.

A decisão de alargar a vida útil do projecto, até 1996 ou 1999, baseou-se na necessidade de se analisarem métodos eficazes de controlar as impurezas do plasma e de se facilitar o escoamento de energia e de partículas em cenários de interesse para o "Next Step" (instalação de diversores adequados) assim como na preparação de uma nova campanha de operação com a mistura de D-T.

4.2. O projecto ITER

O ITER é um "tokamak", actualmente em fase de projecto, a realizar no âmbito de um acordo quadripartido, assinado em 1992, envolvendo a Comunidade Europeia de Energia Atómica (Eurátomo), os Estados Unidos da América, o Japão e a Federação Russa. O objectivo fundamental desta máquina é demonstrar a possibilidade científica e tecnológica de utilização da energia de fusão nuclear para fins pacíficos. Nomeadamente pretende-se criar uma poderosa fonte de energia, a partir da ignição controlada da mistura D-T, e da manutenção da sua queima, por períodos de tempo elevados em regime pulsado, tendo sempre em vista o objectivo final da obtenção do regime estacionário. Este "tokamak" tem já um projecto preliminar detalhado, datado de 1993, que se prevê venha a ser aprovado antes de 1998. O ITER terá uma corrente de plasma de 24 MA, um raio maior de 8.1 m, e um raio menor de 3.0 m e um campo magnético toroidal de 5.7 T e dele se espera a geração de 1.5 GW de potência de fusão, em impulsos com a duração de 1000 s. Prevê-se que o seu projecto definitivo se estabeleça em 1996, que a sua construção se inicie em 1998, que entre em operação em 2005 e que permaneça em funcionamento até 2025.

4.3. O reactor experimental DEMO

DEMO é a designação do "Demonstration Fusion Reactor", máquina que se seguirá ao ITER e que será construida com base nos dados científicos acumulados durante a operação deste, e que deverá ser já capaz de produzir quantidades significativas de energia eléctrica a partir da fusão nuclear. Prevê-se a sua entrada em operação para cerca de 2025, e a construção em série de reactores industriais a fusão nuclear a partir de 2040.

5. A PARTICIPAÇÃO PORTUGUESA

Portugal iniciou a sua colaboração no Programa Europeu de Fusão em 1987, pouco depois de ter aderido à Comunidade, através da participação em experiências europeias (JET e ASDEX). Em 1990 foi estabelecida a Associação EURATOM/IST com os seguintes objectivos: (i) – construir, como infraestrutura do Centro de Fusão Nuclear, uma experiência nacional de plasmas de fusão; (ii) – fomentar a colaboração internacional, nomeadamente na investigação em máquinas europeias de médio e grande porte; (iii) – dar formação científica e tecnológica, na área da fusão, a jovens investigadores e técnicos portugueses.

5.1. O "tokamak' ISTTOK

O "tokamak" ISTTOK, construido a partir da estrutura básica do ex-"tokamak" TORTUR de Nieuwegein (Holanda), foi montado em Portugal de 1990 a 1992. Trata-se de uma pequena máquina, com raio maior de 0.46 m, raio menor de 0.085 m e um campo magnético máximo de 3 T. Para além dos diagnósticos

básicos (sondas magnéticas, dois laços de Rogowskii, bobines seno-coseno para a determinação da posição da coluna de plasma, etc) o ISTTOK dispõe de alguns diagnósticos de concepção avançada como os de difusão de Thomson, de microondas (interferómetro de 100 GHz e reflectómetro de 16-25 GHz) e de análise da deflexão de um feixe iónico (Cs^+, 20 keV, 1 μA).

Com este conjunto de diagnósticos, e dotado de um sistema original de controle e de aquisição de dados, este pequeno "tokamak" está apto a realizar investigação com interesse para o PCF nos seguintes domínios: (i)- caracterização dos plasmas moderadamente quentes e densos em baixo campo magnético; (ii) – estudo da influência da polarização dos limitadores do plasma no seu confinamento; (iii) – análise do comportamento da coluna de plasma pela determinação da evolução espacio-temporal da sua densidade e temperatura; (iv) – estudo da propagação de estruturas não lineares em plasma de fusão, com especial ênfase na dos vórtices produzidos pela aplicação de impulsos de tensão muito curtos (1 μs) e de grande amplitude (2 kV) aos limitadores; (v) – estudo do comportamento do plasma quente em descargas alternadas, em especial nos instantes de tempo em que o campo poloidal se anula por inversão da corrente. (vi) – geração de correntes superficiais no plasma e estudo da sua influência no confinamento; (vii) – estudo da geração não indutiva de corrente em "tokamaks" com vista ao estabelecimento de um regime estacionário de operação; (viii) – estudo do transporte de partículas e de energia nomeadamente através de métodos de fluorescência laser induzida; (ix) – desenvolvimento de novos diagnósticos, usando o seu plasma como amostra representativa do plasma das regiões periféricas das grandes máquinas mundiais.

5.2. A Colaboração com o "Max-Planck Institut für Plasmaphysik"

A colaboração com o "Max-Planck Institut für Plasmaphysik" de Garching iniciou-se em 1987, tendo sido realizado trabalho cientifico e tecnológico no domínio dos diagnósticos de reflectometria de microondas para "tokamaks".

Os resultados mais importantes obtidos com os três reflectómetros instalados no "tokamak" ASDEX, na banda de 16 a 60 GHz, para o estudo das propriedades de transporte em "tokamaks", foram: (i) – a determinação, pela primeira vez no mundo, do perfil de densidade de um "tokamak" com elevada resolução espacial e temporal, desde o centro até à periferia do plasma; (ii) – o estudo das fluctuações da densidade do plasma e em particular dos ELMS ("edge localized modes") e das "ilhas magnéticas"; (iii) – a obtenção de medidas de correlação nas direcções toroidal e poloidal mediante a colocação de antenas em diferentes posições do plasma, e ainda de correlação radial, utilizando a mesma antena e duas frequências distintas obtidas com geradores independentes.

Na sequência do trabalho realizado, o Centro de Fusão Nuclear concebeu e construiu um sistema de reflectometria para o tokamak ASDEX-U, estando actualmente já a operar diversos canais, na banda de 16 a 110 GHz, que utilizam técnicas de varrimento ultra-rápidas (10 μs), de modo a permitir obter resultados precisos em regimes com elevado nível de fluctuações. Dispõe ainda este diagnóstico de um sistema dedicado de aquisição de dados, especialmente desenvolvido para tratar a grande quantidade de informação gerada.

O CFN apresentou ainda, em colaboração com a Associação EURATOM/CIEMAT (Madrid) uma proposta de um sistema de reflectometria de microondas para o "stellarator" W7-X, actualmente em fase de análise pelo "Programme Committee" do PCF.

5.3. A participação no JET e no ITER

A participação portuguesa no projecto JET tem sido feita através: (i) – da adesão da JNICT ao "JET Joint Undertaking" em 1987; (ii) – de três "task agreements" nas áreas do traçado de raios em plasmas na presença de on-

BIBLIOTECA I.S.T.

das híbridas inferiores, do estudo da actividade magneto-hidrodinâmica e dos sistemas de reflectometria de microondas. (iii) – de um contrato para o desenvolvimento de equipamento electrónico de alta frequência para os reflectómetros a instalar futuramente no JET; (iv) – da afectação ao projecto JET de físicos portugueses e (v) – da realização de vários estágios por alunos finalistas universitários.

No que diz respeito ao projecto ITER, o CFN tem participado nas fases de concepção e de projecto de alguns diagnósticos deste futuro "tokamak", com ênfase especial nos sistemas de reflectometria de microondas, área que é coordenada por uma investigadora portuguesa.

5.4. A colaboração com as outras Associações

Investigadores do CFN têm cooperado nos programas de investigação de diversas Associações europeias, nomedadamente em: Cadarache (CEA-DRFP), no estudo da geração de corrente por ondas híbridas inferiores; Milão, no estudo da geração de corrente por ondas electrociclotrónicas; Culham (AEA), através da colaboração no projecto do um pequeno "tokamak" compacto "MAST"; Lausanne (EPFL), na construção de um diagnóstico de espectroscopia de raios-X para o "tokamak" TCV; Madrid (CIEMAT), através da colaboração tripartida, envolvendo a Rússia, no desenvolvimento de diagnósticos por deflexão de feixes iónicos de média energia (20-200 keV).

6. CONCLUSÕES

Após cerca de quatro anos de actividade, pode dizer-se que a Associação EURATOM/IST, integrada no Centro de Fusão Nuclear, teve um rápido crescimento e que atingiu nalguns domínios, como por exemplo no da reflectometria de microondas e no da instrumentação digital, reconhecida competência, o que justifica plenamente a sua integração no Programa Comunitário de Fusão.

O conteúdo deste artigo deixa claro que, num domínio tão vasto como o da fusão nuclear, que envolve áreas tecnológicas tão variadas como as da energia eléctrica, electrónica, microondas de potência e antenas, óptica aplicada e em particular espectroscopia, controle e aquisição de dados, robótica, ciência dos materiais, supercondutividade, manuseamento do trítio e radioactividade, etc, os pequenos países podem ter um papel importante a desempenhar. De facto, através da especialização de pequenas equipas de cientistas e técnicos em domínios específicos, onde se podem satisfazer critérios de excelência e atingir reputação internacional, tal como Portugal já demonstrou, esses países podem vir a cooperar efectivamente, não só no Programa Comunitário de Fusão, mas tambem e a mais longo prazo, em projectos de âmbito mundial, como por exemplo os do ITER e do DEMO.

AGRADECIMENTO

Agradece-se ao "JET Joint Undertaking" a autorização para a reprodução das duas figuras deste artigo, originalmente publicadas em "Nuclear Fusion – Energy for centuries to come ...." EUR 15290 EN (1994).

BIBLIOGRAFIA

A. Livros:

[1] "Plasmas and Controlled Fusion" – D.J. Rose and M. Clarck – The M.I.T. Press – Massachussets – (1961).

[2] "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" – F. Chen – Plenum Press, New York and London (1984).

TÉCNICA, n.º 3 DEZ. 94

[3] "Tokamaks" – J. Wesson – Oxford Science Publications – Clarendon Press – Oxford – (1987).

[4] "Plasma Diagostics" – Hutchinson – M.I.T. Cambridge – U.S.A. – (1987).

[5] "World Survey of Activities in Controlled Fusion Research" – International Atomic Energy Agency (1991).

B. Relatórios internos:

[6] Annual Report – JET Joint Undertaking – U.K (1993).

[7] Progress Report – JET Joint Undertaking – U.K (1993).

[8] Annual Report – Princeton Plasma Physics Laboratory – PPPL-Q-50 – (1992).

[9] Annual Report – Max-Planck Institut für Plasmaphysik – Gärching bei München – IPP/AR (1989).

[10] "The Mega Amp Spherical Tokamak" – UKAEA/EURATOM Fusion Association – Culham Laboratory – Abingdon- OX14 3DB, UK (1994).

[11] "Wendelstein 7-X" – Wendelstein Project Group – IPP/EURATOM Association – (1994).

[12] "Nuclear Fusion: Energy for Centuries to come...." – JET Joint Ubdertaking – EUR 15290 EN – (1994).

[13] "NET – Next European Torus" – Predesign Report – Net Team – Fusion Engineering and Design – North Holland – vol 21, (1993).

C. Artigos em revistas cientificas internacionais:

[14] "Diagnostics for Fusion Devices" – TFR Team – Nuclear Fusion vol 18, nr 5, pg 647 (1978).

[15] "Reflectometry in Fusion Devices" – M.E. Manso – Plasma Physics and Controlled Fusion, vol 35 pg B141, (1993).

[16] "Tokamaks" – B.B. Kadomtsev, F.S. Troyon and M.L. Watkins – Nuclear Fusion vol 30 n∫ 9 , 1675, (1990).

[17] "Development of a New Type of Cs Plasma Ion Gun for Application in a Heavy Ion Beam Tokamak Diagnostic" – J.A.C. Cabral, O.J. Hancock, A.J. Holmes, M. Inman et al – Plasma Sources Science and Technology.

[18] vol 3, pg 1 (1994).

[19] "The Heavy Ion Beam Diagnostic for the Tokamak ISTTOK" – J.A.C. Cabral, A.Malaquias, A. Praxedes and C.A.F. Varandas – IEEE Transactions on Plasma Science- vol 22 n.º 4 pg 350, (1994).

[20] "Vacuum Technology on Fusion Devices" – C.A.F. Varandas – Vacuum – vol 45 n.º 10/11 (1994).

[21] "A 100 MHz VME Data Acquisition System" – Simıes, P.C., Simıes, J.B., Correia, C.M., Sousa, J. et al – Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A 337 – pg 182, (1993).

[22] "A Fully Computerized and Distributed VME System for Control and Data Acquisition on the Tokamak ISTTOK" – Varandas, C.A.F., Carvalho, B.B., Correia, C., Fernandes et al – Nuclear Instruments & Methods in Physics Research – A 349 – pg 547, (1994).

[23] "Portuguese Research Programme on Nuclear Fusion" – C.A.F. Varandas, J.A.C. Cabral, M.E. Manso and F. Serra – Journal of Fusion Energy – Artigo aceite para publicação (1994).

D. Artigos em revistas nacionais:

[24] Fusão Nuclear controlada: A energia do século xxi" – J.T. Mendonça – Técnica 1.87, pg 25 (1987).

[25] "A Fusão Nuclear Controlada e as Experiências Tokamak" – J. T. Mendonça – Colóquio/Ciências – Fundação Calouste Gulbenkian – ano 4 n.º 11 (1993).

[26] "A Instalação em Portugal da Primeira Experiência de Plasmas de Fusão: o Tokamak ISTTOK" – C.A.F. Varandas, J.T. Mendonça, J.A.C. Cabral, M.P. Alonso, et al – Gazeta de Física vol 14, fasc 3, pg 86 (1991).

[27] "Aspectos Operacionais do Tokamak ISTTOK" – C.A. F. Varandas, J.T. Mendonça, J.A.C. Cabral, B.B. Carvalho et al, Gazeta de Física – vol 14 fasc 4, pg 128 (1991).

THE IDEAL GAS EQUATION $p = \alpha u$ AND THE ENERGY – ENTROPY PRINCIPLE

Rodrigo de Abreu
Centro de Electrodinâmica, Instituto Superior Técnico

ABSTRACT

The fundamental aim of this article is to show that, by considering an ideal gas defined through $p = \alpha u$, this relation between force and energy contains the whole thermodynamic information about the system. As a matter of fact we show that there is no need for an a *priori* introduction of the variables temperature or entropy since they result from the above relation and from the Energy Conservation Principle. Previous tautological treatments are thus eliminated and equations $p = \alpha u$ and $pV = BT$ are related with generality. The theory is general since the ideal gas considered has the photon gas, which, of course, is ever present.

1. INTRODUCTION

The relation between $p = \alpha u$, and the other pressumed thermodynamic quantities have already been treated in the literature (Uhlenbeck 1932, London 1938, Einbinder 1948, Einbinder 1949, Miller 1960, Landsberg 1961, Landsberg 1974).

We shall, however, demonstrate that when $p = \alpha u$, it is possible to associate temperature with energy through the relation $U = AT$ where A is constant along the isentropic transformation.

An ideal gas therefore satisfies $pV=BT$ and if B is approximately constant along an isothermal line, then the gas behaves like a classical ideal gas.

The preceeding statements can be demonstrated through a generalization of Carnot's theorem (Abreu 1983) which permits an easy interpretation of the relations arising from Energy and Entropy. This generalization makes it possible to treat in the same way a photon gas or another Bose-Einstein or Fermi-Dirac gas, the reasoning that led Boltzmann to the deduction of Stephan's law having been used in a similar way. With this synthesis we can achieve a great simplicity and previous tautologies are eliminated. In VIII, and in a more abstract way, the formalism which condenses the relations previously established is directly obtained from $U=U(S,V)$.

2. ENTROPY and $p = \alpha u$

The relation $p = \alpha u$ shows that if pressure increases, the energy density increases as well.

This being the case, if the gas (Abreu 1987) follows a trajectory in the domain of variables p and V coming back to its initial volume, its pressure will be necessarily higher than or equal to the initial one (Abreu 1985, Pau Chang-Lu 1982, Abreu Faro and Abreu 1987, Abreu Faro and Abreu 1990). The pressure will be the same if the external force is always equal to the internal force. In this way the gas energy cannot be only a function of the volume, as can be seen in relation $U = pV/\alpha$. We can therefore introduce the entropy S variable satisfying the following conditions:

1. $U = U(S,V)$
2. $U(S_2,V_2) \geq U(S_1,V_1)$
   if $V_2 = V_1$

It is then possible to choose $S_2 > S_1$ for the situation considered in the inequality of condition 2. S_2 is equal to S_1, obviously when $U(S_2,V_2) \geq U(S_1,V_1)$ if $V_2 = V_1$. The reversible transformation is the isentropic transformation.

It is thus shown that equation $p = \alpha u$ (and the condition of tendency of equilibrium which is implicity associated with it since the piston for a given equilibrium pressure of the gas has a pressure on it higger for a compression and lower for an ex-

* Work presented at the Int. Conf. on Phys. Ed., "Light and Information", Universidade do Minho, Braga, Portugal (1993)

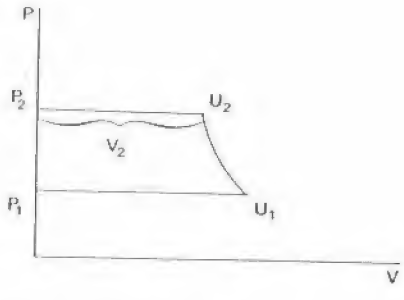
TÉCNICA, n.º 3 DEZ. 94

pansion) (Abreu Faro and Abreu 1987) contains the condition of irreversibility of the 2nd Principle of Thermodynamics, a strictly axiomatic formulation being therefore avoided in establishing the relations between energy and entropy.

3. GENERALIZATION OF CARNOT THEOREM

A gas constituted by interactionless particles exerts a pressure $p = \alpha u$ where a is constant and u is the energy density (Einbinder 1948).

Let us consider two reservoirs R_1 and R_2 containing the same ideal gas at pressures p_1 and p_2. The two reservoirs R_1 and R_2 have, on equilibrium points, constant physical properties per unit volume – they are sufficiently large. Also satisfy the following conditions: they may be connected by an isentropic transformation after N_2 particles of R_2 have been absorbed into the inner part of a cylinder provided with a piston, and whose volume passes from 0 to V_2. Once pressure p_1 has been attained, the volume of the cylinder goes back to zero upon injection of N_1 particles into reservoir R_1 (Fig. 1)



The efficiency of the reversible cycle which uses the ideal gas, the above-mentioned cycle, is, $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

where T is the Kelvin Temperature, as we shall demonstrate, which generalizes the result already known for the Carnot Cycle and which can also be obtained from the latter, (from this analysis we can see why Carnot' analysis is independent of the caloric conservation hypothesis because here we have, indeed, a substance flowing between the reservoirs (Abreu 1983)).

Let U stand for the energy of the gas contained in the vessel provided with a piston and U_e denote the energy of the gas in the reservoir.

The Energy Conservation Principle permits us to write that the elementary work is

$$dW = dU + dU_e \tag{1}$$

Let us assume that the volume passes from 0 to V_i (i=1,2) reversibly in contact with R_i.

Since

$$p_i V_i = \alpha U_i$$

we have

$$p_i V_i = -\alpha U_i = U_i + \Delta U_{ei} \tag{2}$$

We therefore have

$$\Delta U_{ei} = \pm(\alpha + 1) U_i \tag{3}$$

Let us define the efficiency η:

$$\eta = \frac{|W|}{|\Delta U_{e2}|} = \frac{|\Delta U_{e2}| - |\Delta U_{e1}|}{|\Delta U_{e2}|} \tag{4}$$

or

$$\eta = 1 - \frac{U_1}{U_2} \tag{5}$$

Let us consider that both in R_1 and R_2 we have a mixture of two gases. We shall assume that one of them constituted by photons, which can pass alone from the reservoir, (H. Davy calls phoxygen to the mixture of oxygen and light) (Abreu 1993(a)).

In what concerns the particles of the other gas we consider that such a transit alone is forbiden.

Therefore for the photons we have

$$\eta_f = 1 - \frac{U_{1f}}{U_{2f}} \tag{6}$$

As to the properties of the mixture (which will henceforth be distinguished by a horizontal line) we have

$$\bar{p} = p + p_f = \alpha u + \alpha_f u_f = \bar{\alpha}\bar{u} \tag{7}$$

if we assume that the mixed gas is an ideal one; if not (7) is valid for an infinitesimal cycle (see IV and Appendix).

Since $\bar{p} = \bar{\alpha}\bar{u}$,

$$\eta = 1 - \frac{(\bar{\alpha}+1)\bar{U}_1}{(\bar{\alpha}+1)\bar{U}_2} = 1 - \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = 1 - \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = 1 - \frac{\bar{U}_{1f}}{U_{2i}} \quad (8)$$

since $\bar{U}_i = U_i + U_{if}$ and $\eta = 1 - \frac{|\Delta U_{ei}|}{|\Delta U_{e2}|}$

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{|\Delta U_{ei}|}{|\Delta U_{c2}|}$$

with $|\Delta\bar{U}_{ei}| = (\alpha+1)\bar{U}_i + (\alpha_f+1)\bar{U}_{if}$ (i=1,2)

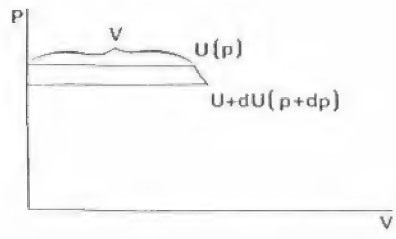
4. THE ISENTROPIC TRANSFORMATION EQUATION FROM THE GENERALIZATION OF CARNOT THEOREM

Let us consider a cycle defined as previously but assuming that pressures p_1 and p_2 differ by an infinitesimal quantity dp.

The absolute value of the work is

$$|dW| = |dp\ V|$$

where V is the volume at which the reversible expansion, without contact with the reservoir, is initiated (Fig. 2).



Since the efficiency is $\eta = 1 - \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_2 - U_1}{U_2}$,

we have

$$\eta = \frac{|dW|}{|\Delta U_{e2}|} = \frac{dpV}{\Delta U_{e2}} = -\frac{dU}{U} \quad (9)$$

It is easy to show from (3) and (9) show that

$$UV^{\alpha} = \text{constant} \quad (10)$$

Identity (10) is the isentropic transformation equation.

5. INTRODUCTION OF THE CONCEPT OF TEMPERATURE FROM THE GENERALIZATION OF CARNOT THEOREM. THE CLASSICAL GAS EQUATION.

As previously seen, the efficiency of the cycles defined between R_1 and R_2 is

$$\eta = 1 - \frac{U_1}{U_2} = 1 - \frac{U'_1}{U'_2},$$

where U_1, U_2, U'_1 and U'_2 are two pairs of values of the gas energy contained in the cylinder when in connection with R_1 and R_2 and which define two isentropic transformation.

Since $\frac{U_1}{U_2} = \frac{U'_1}{U'_2}$, we can write

$$U = AT, \quad (11)$$

where A is constant throughout the isentropic transformations.

The efficiency can therefore be given by (9) or by

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (12)$$

Since $p = \alpha u$ and $U = AT$, we have

$$pV = \alpha AT = BT \quad (13)$$

Let us assume that both R_1 and R_2 are separated by a wall, transparent only to photons, the identity (Pearson 1984) of the energy density being therefore associated with the radiation of both sides of the dividing wall. We have in both parts of R_1 (or R_2) a gas mixture of photons and another ideal gas. We admite the transparency of the dividing wall only to photons. Therefore we can have different pressures P_1 and $\hat{P}_1$ for the gas in the different sides of the reservoirs.

TÉCNICA, n.º 3 DEZ. 94

We have from (8)

$$\eta = 1 - \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = 1 - \frac{U_1}{U_2} = 1 - \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} \qquad (14)$$

where $\hat{U}$ and U are energies of N_1 particles of a gas at pressures $\hat{p}$ and p corresponding to the conditions of both sides of the dividing wall and such that it is possible to pass, by causing the volume to vary, from one condition to the other; that is, if N_1 particles from R_1 part are absorbed at pressure p_1 and energy U_1, it is possible, by varying the volume, to attain conditions N_1, $\hat{p}_1$, $\hat{U}_1$ corresponding to the other side of the dividing wall as long as contact with R_1 is maintained and therefore in the presence of R_1 radiation. An isothermal transformation of the N_1 particles has thus been defined.

From (28) and (30) we get

$$\eta = 1 - \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = 1 - \frac{U_1}{U_2} = 1 - \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

We have then demonstrated that the efficiency of *all* the reversible machines functioning between R_1 and R_2 is $\eta = 1 - \frac{U_{1f}}{U_{2f}}$ where U_{1f} and U_{2f} are the values of the photon gas energy on the extreme points of an isentropic transformation that connects the reservoirs.

We can then introduce the quantity temperature so that

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

THE CLASSICAL IDEAL GAS EQUATION

As we have seen, we have

$$U_i = A\,T_i$$

and

$$p_iV_i = \alpha AT_i = BT_i \qquad (16)$$

An isentropic equation is, as we have seen,

$$UV^{\alpha} = \text{cte.}$$

Since

$$U = AT,$$

we have:

$$TV^{\alpha} = \text{cte.} \qquad (17)$$

Consequently A is a function of TV^{α}

$$A = A(TV^{\alpha}) \qquad (18)$$

Since TV^{α} varies along an isothermal line, so does the A value varies along an isothermal line. Experimentally it is however found that there exist temperature and pressure ranges where A is practically constant and has the same value several gases thus satisfy pV = BT with constant B. (see Appendix).

6. THE PHOTONS ENERGY DENSITY AS A FUNCTION OF TEMPERATURE.

For the photons $\alpha_f = \frac{1}{3}$.

Taking (10) into account, we have (Einbinder 1949)

$$U_f^3V = \text{const.} = \lambda$$

or

$$U_f^4 \frac{V}{U_f} = \lambda$$

and from (11)

$$u_f = \lambda^{-1}A^4T^4$$

Since u_f = const. we have T = const. for R_1 or R_2 photons, therefore

$$u_f = \sigma T^4 \qquad (19)$$

where

$$\sigma = \lambda^{-1}A^4 = \text{const.}$$

for all equilibrium points and σ is a universal constant.

7. THE DEFINITION OF THE IDEAL GAS

The designation of classical ideal gas (Landsberg 1961) is used for a gas satisfying

$$pV = BT$$

BIBLIOTECA IST

and

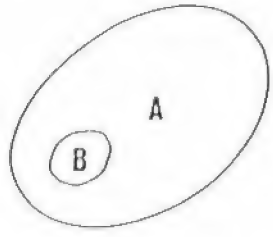
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \text{const.}$$

But when $U = AT$ with A being constant, with the definitions of C_p and C_v, (see Appendix) we have $\gamma = \text{const.}$ and $pV = BT$ with constant B.

Therefore, when gases satisfy $p = \alpha u$ (Einbinder 1948), a classical ideal gas is defined by $pV = BT$ with B constant. In this way, B class defined in Landsberg's (Landsberg 1961) article, coincides with A class defined in the same article for all gases satisfying $p = \alpha u$.

An ideal gas is defined by $pV = \alpha u$. It also satisfies $pV = BT$. When B has a small variation, the gas fulfils the conditions to be considered a classical ideal gas.

We may have, in short, the following scheme:



A. Ideal gas $pV = \alpha u \equiv pV = BT$ where $B = B(TV^{\alpha})$

B. If $B = \text{cte.}$ - classical ideal gas.

8. TEMPERATURE DEFINITION THROUGH THE THERMODYNAMICS RELATION and $pV = \alpha U$.

We are now going to present the formalism that synthesis the preceding analysis.

As we seen in 2., $U = U(V,S)$.

For an infinitesimal transformation we have

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV + \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS \qquad (20)$$

If $dS = 0$, we have

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV .$$

But if (Abreu 1991) $dS = 0$,

$$dU = -p\, dV$$

since $dU = dW$ and $dW = -pdV$ in a reversible transformation (Abreu 1990, Abreu 1991).

Therefore

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_S = -p \qquad (21)$$

Let us make (Abreu 1985)

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T \qquad (21)$$

We have then

$$dU = -pdV + TdS, \qquad (23)$$

in a quasi-static transformation which is not necessarily a reversible (Abreu 1990, Abreu 1991, Allis 1952, Curzon and Leff 1979)

Since $p = \alpha u$

$$p = -\frac{\partial U}{\partial V} = \alpha \frac{U}{V} \qquad (24)$$

Consequently

$$-\frac{dU}{U} = \alpha \frac{dV}{V} \qquad (25)$$

along the line $S = \text{const.}$

From (25) there results

$$UV^{\alpha} = \text{const.} \qquad (26)$$

along $S = \text{const.}$

Now from $U = U(S,V)$ and making $T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V = +\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S \qquad (27)$$

is obtained.

Since $p = \alpha u$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V = \alpha \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right) \frac{1}{V}$$

But since:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V = -\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$$

$$-\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = \alpha T \frac{1}{V} \qquad (28)$$

Along S = const. we therefore verify

$$TV^{\alpha} = \text{const.} \quad (29)$$

Since UV^{α} = const. is also verified along S = const. then

$$U = AT \quad (30)$$

CONCLUSIONS

It has been the aim of this article to show that from equation $pV = \alpha U$ for an ideal gas, it is possible to establish the concept of temperature. For this purpose we have used two sufficiently large reservoirs where, on equilibrium points, the physical properties per unit volume are constant. Alternatively and in an equivalent way, such a concept can be established through $p = \alpha u$ and the relation $T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V$ (Abreu 1985). To this end, it is demonstrated that the efficiency of a cycle described by a gas satisfying $p = \alpha u$ is $\eta = 1 - \frac{U_1}{U_2} = \text{cte.}$ where U_1 and U_2 are the gas energies on the extreme of isentropic transformations that connect both reservoirs or, in a more abstract way, through the formalism emerging from U = U(S,V) since the entropy arises as a consequence of the irreversibility inerent in $p = \alpha u$ (Abreu 1985), and of the equilibrium implicity assumed (Abreu Faro 1987). Since light satisfies $p = \alpha u$ the efficiency of all cycles is

$$\eta = 1 - \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

It is demonstrated that equation pV = BT is satisfied for all ideal gases. The classical ideal gas is defined only through the condition B = const. and not through both conditions pV = BT where B is constant and $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \text{const.}$ (Landsberg 1961, Landsberg 1974).

A great simplicity is, in this way, achieved and tautologies (Miller 1960, Landsberg 1961, Pearson 1984, Fermi 1936, Buchdahl 1973, Home 1977, Ehrlich 1981, Thomsen 1983) are avoided, a generalization of Carnot theorem having been resorted to, which, together with the Energy Conservation Principle, clearly shows the non-essential character of the First Principle of Thermodynamics (Abreu 1990, Abreu 1991, Abreu 1993(b), Abreu 1994). This being so one can understood and reinterpret the historical way of introducing the physical ideas of thermodynamics with a new perspective emerging from the generalization of Lord Kelvin postulate: A transformation whose only final result is to transform internal energy into Work is impossible (Abreu 1991).

REFERENCES

Abreu Faro, M.de and Abreu, R. de, A One-Dimensional Model of Irreversibility, Centro de Electrodinâmica, internal report, I.S.T. (1987).

Abreu Faro and Abreu, Comunicação à Classe de Ciências, XXXI, Lisboa (1990).

Abreu, R. de, Contribution to the elucidation of some fundamental problems associated with the first and second principles of thermodynamics – relativistic transformations p. 43, Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon, 1983.

Abreu, R. de, Técnica 1, 43 (1990).

Abreu, R.de, Técnica 1 and 2, 100 (1985).

Abreu, R. de, Técnica 1, 50 (1987).

Abreu, R. de, Técnica 2, 33 (1991).

Abreu, R. de, Internat. Conf. On Phys. Ed. "Light and Information", Abstracts 2.5, Univ. do Minho, (1993(a)).

Abreu, R.de, Técnica 1, 15, 35, 65, 69 (1993(b)).

Abreu, R.de, Técnica 1, 53 (1994).

Allis and Herlin, Thermodynamics and Statistical Mechanics, (Mac Graw-Hill, 1952) pp. 168-170.

Barrow, G.M., J. Chem. Educ., 65, 122 (1988).

Buchdahl, H.A. Am. J. Phys., 41, 1203 (1973).

E. Fermi, E. Thermodynamics (Dover Publications, INC., New York, 1936) p. 62.

Ehrlich, P. Am. J. Phys., 49, 622, (1981).

Einbinder, H. Phys. Rev. 74, 803 (1948).

Einbinder, H. Phys. Rev. 74, 805 (1948).

Einbinder, H. Phys. Rev. 76, 410 (1949).

Home, D. Am. J. Phys., 45, 12 (1977).

Landsberg, P.T. Am. J. Phys. 29, 695 (1961).

Landsberg, P.T. Proc. of the Int. Research Symp. on Stat. Phys. with Special Sessions on Topics Related to Bose Statistic, Calcutta (1974).

London, F. Phys. Rev. 54, 947 (1938).

Miller, D.G. and Dennis, W. Am. J. Phys. 28, 796 (1960).

Pau-Chang Lu, Am. J. Phys. 50, 247 (1982).

Pearson, J.M. Am. J. Phys. 52, 262, (1984).

Thomsen, J.S. Am. J. Phys., 51, 462, (1983).

Uhlenbeck, G.E. and Uehling, E.A. Phys. Rev. 39, 1014 (1932).

APPENDIX

Definition and computation of $\tilde{\gamma}$
From H = U + pV
we have

$$H = U + \alpha U = (\alpha + 1)U$$

Since $p = \alpha u$.

Therefore

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V = (\alpha + 1)\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V;$$

or

$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V = (\alpha + 1)\, C_V$. Only for an classical ideal gas we have $\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = C_p$.

Since

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V.$$

Defining

$$\gamma = \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V}{\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V},$$

we have

$$\gamma = (\alpha + 1)$$

Then, an isentropic equation is

$pV^{\gamma} = cte.$

Consider a mixture of an classical ideal gas + photons.

The $\tilde{\gamma}$ mixture can be calculated from

$$\tilde{H} = \tilde{U} + \tilde{p}V$$

$$= U + U_F + NKT + \frac{1}{3}aT^4V$$

$$\tilde{H} = NKT\frac{5}{2} + \frac{4}{3}aT^4V$$

and from the internal energy in

$$\tilde{U} = \frac{3}{2}NKT + aT^4V$$

Therefore $\tilde{\gamma}$ for the mixture is

$$\tilde{\gamma} = \frac{NK\frac{5}{2} + \frac{4}{3}a4T^3V}{NK\frac{3}{2} + 4\,aT^3V} \qquad (A)$$

The mixtures value of $\tilde{\gamma}$ varies from 1.33 (photon γ) to 1.66 (classical monoatonic γ). Since $TV^{(\tilde{\gamma}-1)}$ = constant we can define the isentropic equation by an interactive method. This being so, with generality, when a classical ideal gas is compressed reversibly $\tilde{\gamma}$ change, satisfying $TV^{(\tilde{\gamma}-1)}$constant and (A). The mixture, of course satisfies the equation

$$\tilde{p}\tilde{V} = (\tilde{\gamma} - 1)U$$

$$\tilde{p}\tilde{V} = (\tilde{\gamma} - 1)\left(\frac{3}{2}NKT + aT^3V\right)T$$

$$\tilde{p}\tilde{V} = BT$$

With

$$B = (\tilde{\gamma} - 1)\left(\frac{3}{2}NKT + aT^3V\right)$$

Therefore for a gas without interactions, B value change because the gas is not a classical or (and) because the photon gas can not be neglected.

ICTPOL

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE POLÍMEROS

Infra-estrutura de Apoio Científico e Tecnológico à Indústria dos Polímeros, Borrachas, Tintas e Vernizes, Adesivos, Produtores de Resinas, etc..

- Investigação e Desenvolvimento
- Testes e Ensaios
- Controlo de Qualidade
- Consultadoria
- Formação Profissional

CONTACTE: **ICTPOL**

Prof. Gabriel Feio
Av. Prof. Gama Pinto, 2 - 1699 LISBOA CODEX - Tels.: 795 07 90 - 795 42 90 - Fax: 796 56 22

Prof. A. Correia Diogo (Dep. de Engª. de Materiais do IST)
Av. Rovisco Pais - 1096 LISBOA CODEX - Tel.: 847 34 21 - Fax: 849 92 42

Prof. José Covas (Universidade do Minho)
Largo do Passo - 4719 BRAGA CODEX - Tel.: (053) 61 22 34 - Fax: (053) 61 22 56

SÃO SÓCIOS DO ICTPOL, ALÉM DOS INSTITUTOS, LABORATÓRIOS E UNIVERSIDADES, AS EMPRESAS E ASSOCIAÇÕES INDUSTRIAIS DO SECTOR

Aqui poderia estar um anúncio seu.

Para mais informações contacte-nos pelos telefs.: (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef.: (01) 353 73 16
ou escreva-nos para: DOSSIER, comunicação e imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18-2.° – 1000 LISBOA

ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF POLYMER ELECTROLYTES

Eng.º Luís L.P.S. Araújo and C.A.C. Sequeira
Departamento de Engenharia Quimicam I.S.T., Lisbon

ABSTRACT

The solvating power of polyethylene oxide (PEO) with alkali salts was discovered in 1978 and attracted immediate attention in view of its potential applications in solid state electrochemistry. Over the last years, the combined efforts of polymer scientists, electrochemists and physicists have led to a better understanding of the conductivity mechanism and to improved synthesis techniques.
Some of the most commonly used polymer electrolytes are reviewed here, including linear and crosslinked polymers as well as ionic and protonic conductors involving PEO, polyethylene imine (PEI), polyvinyl pyrrolidone (PVP) and ormolytes (a new organic-inorganic polymer) as the solvating matrix. The main applications foreseen are as electrolytes for solid state batteries, electrochromic systems and gas sensors.

1. INTRODUCTION

Over the last decade, the new field of ionically and electronically conductive polymers has become an important part of solid state electrochemistry. These new electrolytes combine the advantages of polymer materials (e.g. plasticity, easy processing and light weight) with conductivity performance approaching that of liquids.

Polymer electrolytes lie in between the solid and liquid state. The macromolecule acts as solvent for a salt or a strong mineral acid, which becomes partially dissociated. The polymer backbone appears to be immobile, but on the atomic scale, small organic chain movements occurring on a very short time scale (approximately 10^{-8} - 10^{-10} s) are responsible for ionic conductivity.

The existence of complexes of polyethylene oxide (PEO) and alkali metal salts was first demonstrated by Fenton and co-workers [1,2], and the considerable potential of these materials as polymer electrolytes was later put forward by Armand and co-workers [3,4].

More recently, Lassègues et al. [5] have investigated the superprotonic conductivities of compounds with the general formula $XHSO_4$, where X can be a salt or a polymer such as polyethylene imine (PEI) or polyacrylamide (PAAM). Amorphous protonic polymer electrolytes were obtained with conductivities of the order of 10^{-2} S cm^{-1} at room temperature and remaining around 10^{-5} S cm^{-1} until -65°C. The segmental motion of the organic chain is probably supplied by a cooperative motion of the hydrogenosulphate anion and the amide function to ensure fast protonic conductivity. Around the same time, Charbouillot et al. synthesized aminosil [6], an organic-inorganic polymer midway between a glass and a polymer electrolyte. Aminosil led to further development with ormolytes, the electrolytic version of ormocers, developed by Schmidt [7] and combining the electrolytic properties of organic polymers with the mechanical and chemical strength of the glassy inorganic backbone.

2. ELECTROCHEMICAL PROPERTIES

2.1. Redox stability domain

Before proposing these materials as solid electrolytes in batteries, it is necessary to determine their redox stability. The electrolyte must be inert with respect to both electrode materials, corresponding to very different chemical activities, as for example in the system Li/(PEO)LiCLO_4/TiS_2 where lithium is the negative and TiS_2 the positive electrode. This redox stability domain is determined with the classical three-electrode cyclic voltammetry method proposed by Sequeira and co-workers [8-10]. Typical cyclic voltammograms [8-10] show the redox stability range of (PEO) LiI in Fig.I, (PEO)Li$CFSO_3$ in Fig.2, (PEO)KI.2$ZnCl_2$ in Fig.3 and (aminosil) 0.IHCF_3SO_3 in Fig.4.

TÉCNICA, n.º 3 DEZ. 94

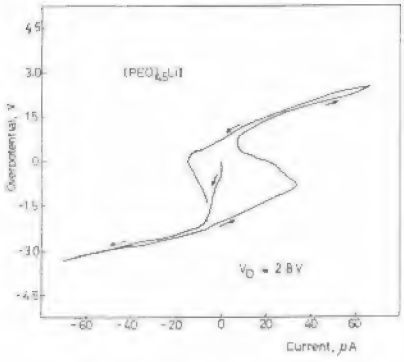


Fig. 1 Cyclic voltammogram for PEO (LiI) at 80°C with a scanning rate of 100 mV S^{-1} [8]

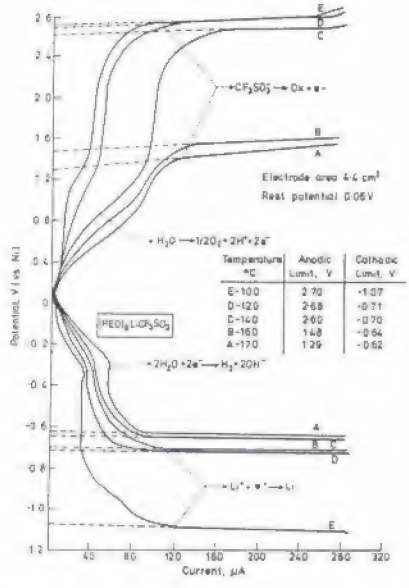


Fig. 2 Anodic and cathodic polarization curves for $(PEO)_9LiF_3CSO_3$ at platinum electrodes [9]

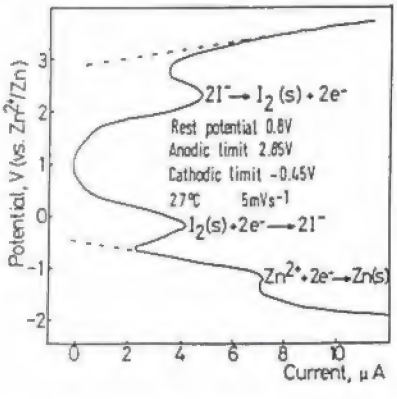


Fig. 3 Anodic and cathodic polarization curves for $(PEO)_4.Ki.2ZnCl_2$ at platinum electrodes [10]

2.1.1. *Cathodic domain*

Using thermodynamically stable anions (I^-, Br^-), the stability of the polymer with respect to reduction was investigated. Figure 1 shows the voltammogram for (PEO) LiI. No peak is visible before the $Li^+ \rightarrow Li^0$ reduction at -2.2V. The absence of any parasitic reaction is corroborated by the excellent (greater than 80%) recovery of the plated metal. Similar results have been obtained with NaI and LiBr. The polyether stability expected from the strong C-O bonds (86 Kcal mol^{-1}) is thus at least similar to that of micromolecular ether solvents (DME, THF, etc.).

Some other anions, however, undergo a reductive cleavage which is visible before the metal deposition. Thiocyanate is reduced according to $SCN^- + 2e \rightarrow S^{2-} + CN^-$ at - 1.8V.

2.1.2. *Anodic domain*

The cyclic voltammogram in Fig. 1 shows clearly the anodic limit due to I^- oxidation at +0.6 V. The voltage stability window of LiI in PEO is thus 2.8 V, in close agreement with the thermodynamic value (2.81 V). The activity of the dissolved salt in the polymer is thus close to unity.

In Fig. 2, the voltammogram for the (PEO)-$LiCF_3SO_3$ complex is shown. In the cathodic domain, the plating-stripping of lithium metal could again be observed. Since the trifluoro methane sulphonate anion is much more effective in resisting oxidation, an anodic wall is only visible at ~ +2.9V. At this potential an irreversible reaction occurs, probably that of CF_3SO_3- with the polymer.

With such a stable (metastable) anion, a redox stability domain of 3.5V vs. M/M^+ is obtained. This stability window is sufficient for the possible use of these electrolytes in solid batteries using intercalation compounds [3].

A voltammogram of aminosil is presented in Fig. 4. The cathodic wall (A) corresponds to the formation of hydrogen: the reaction H^+ (aminosil)+e^- (Pt) $\rightarrow 1/2 H_2$ seems to be reversible, suggesting that protonic conduction is not negligible. The

BIBLIOTECA I.S.T.

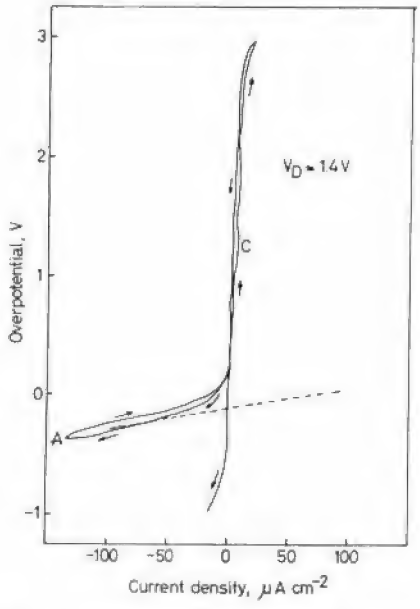


Fig. 4 Cyclic voltammogram for aminosil performed with a platinum electrode [8].

anodic peak (C) occurring at +1.3 V is similar to a passivation reaction. It is irreversible, specific and destructive with respect to the polymer, probably leading to the degradation of the alkylamine chain. The stability domain of the material is then 1.4 V.

2.2. Transference number

Usually, solid electrolytes (glasses, crystallized ionic conductors) exhibit unipolar conduction. In solvating polymer electrolytes, both ions move. Anion transference, determined by different techniques, is in the range 0.2-0.8. The most frequently used techniques are Tuband's method [11], and NMR [12] and AC impedance [13,14].

In the case of batteries using liquid electrolytes, mixed ion transport (anion and cation) is a major cause of electrode degradation. The situation is different with polymer electrolytes, since the high viscosity of the backbone avoids ionic convection motion.

Furthermore, in a polymer electrolyte, the flow density is limited by anionic transference because of the anion backscattering induced by the chemical potential gradient. Consequently the flow intensity is limited to a low value: 0.1 mA cm^{-2} [11].

3. CONCLUSIONS

Organic polymer electrolytes generally have good conductivity in the amorphous state over a wide redox stability area. Unfortunately, most linear polymers with high molecular weight are crystalline at room temperature. This major drawback can be avoided by using other polymeric materials, namely comb-branched polymers with short chain lengths or by turning towards the new organic-inorganic polymers: ormolytes and new polymer electrolytes with grafted anions.

REFERENCES

[1] D.E. Fenton, J.M. Parker and P.V. Wright, Polymer, 14 (1973) 585.

[2] P.V. Wright, Brit. Polymer J., 7 (1975) 319.

[3] M.B. Armand, in J.R. MacCallum and C.A. Vincent (eds.), Polymer Electrolyte Review 1, Elsevier Applied Science, London, 1987.

[4] M.B. Armand and M. Gauthier, in T.Takahashi (ed.), Solids with High Conductivity, ASSI, Singapore, 1989.

[5] J.C. Lassègues, B. Desbat, O. Trinquet, F. Cruege and C .Poinsignon, Proc. Solid State Protonic Conductors IV, Exeter, September 12-16, 1988, in Solid State Ionics, 1989.

[6] Y. Charbouillot, D. Ravaine, M. Armand and C. Poinsignon, J. Non-Cryst. Solids, 103 (1988) 325.

[7] H. Schmidt, J. Non-Cryst. Solids, 73 (1985) 681.

[8] L.P.S. Araújo and C.A.C. Sequeira, unpublished results.

[9] C.A.C. Sequeira, J.M. North and A. Hooper, Solid State Ionics, 13 (1984) 175.

[10] T.M.A. Abrantes, L.J. Alcácer and C.A.C. Sequeira, Solid State Ionics, 18&19 (1986) 315.

[11] A. Bouridah, F. Dalard, D. Deroo and M.B. Armand, Solid State Ionics, 18-19 (1986) 287.

[12] W. Gorecki, R. Andreani, C. Berthir, M.B. Armand, M. Mali and J. Brinkmann, Solid State Ionics, 18-19 (1986) 295.

[13] M.J.C. Plancha, C.M. Rangel and C.A.C. Sequeira, Solid State Ionics, 58 (1992) 3.

[14] C.A.C. Sequeira, M.J.C. Plancha and L.P.S. Araújo, J. Physique IV, Cl, 4 (1994) 17.

TÉCNICA, n.º 3 DEZ. 94

O Prof. David Gibson, da *University of Texas at Austin* (UTA), deslocou-se ao Instituto Superior Técnico de 12 a 16 de Dezembro de 1994 para realizar um curso sobre o tema genérico "Transferência de Tecnologia". Esta inciativa corresponde ao primeiro passo de um processo de coperação entre o IST e a UTA. A UTA detem uma vasta experiência no processo de transferência de tecnologia da universidade para a sociedade, tendo dinamizado um instituto especialmente vocacionado para o efeito, o IC²-*Innovation, Capital and Creativity*.

O Presidente do IC², George Kozmetsky (primeiro a contar da esquerda) e o Dr. David Gibson (terceiro a contar da esquerda).

A colaboração entre as duas entidades universitárias será materializada através do envolvimento do ITEC, especialmente no que diz respeito à incubação de empresas de base tecnológica, e do Gabinete de Estudos e Planeamento do IST (GEP). No âmbito do GEP está previsto o estudo da evolução da UTA, integrando-se num Estudo Comparativo do IST com Universidades Estrangeiras com performances excelentes.

Por último, está planeado o intercâmbio de docentes e de alunos de pós-graduação, tendo em vista aproximar as comunidades das duas universidades e rentabilizar as complementaridades existentes entre o IST e a UTA

O IC2-*Innovation, Capital and Creativity: networking entrepreneurship for globally shared prosperity.*

O IC2 da *University of Texas at Austin* é um centro internacional de investigação nas áreas da inovação tecnológica, criatividade e capital. Os objectivos do Centro são quatro, a saber:

- estudar e analisar o sistema empresarial e, em especial, o impacto da tecnologia no seu desenvolvimento;
- elaborar aboradagens criativas ao estudo de questões fulcrais do desenvolvimento empresarial, económico e tecnológico;
- disseminar resultados de investigação através de monografias, *papers*, conferências e livros;
- construir uma rede global ligando universidades de todo o mundo e promovendo a realização de projectos de investigação em comum.

REDES NEURONAIS EM ROBÓTICA

Pedro Quintas Aguiar * e Luís Borges de Almeida
IST – INESC

RESUMO

Este artigo resulta de uma pesquisa bibliográfica sobre as possíveis aplicações de redes neuronais artificiais a problemas típicos da engenharia do controlo e robótica. Ao contrário dos métodos "clássicos" para a resolução deste tipo de problemas, as técnicas conexionistas recentemente desenvolvidas carecem de um formalismo uniforme e genérico no tratamento de situações conceptualmente idênticas. Os bons resultados que se tem vindo a obter com a utilização de redes neuronais em sistema de controlo, aliados à referida carência, justificam o contributo que este trabalho tenta dar para um melhor conhecimento e organização das muitas soluções recentemente publicadas.

Assume-se que o leitor está familiarizado com os algoritmos mais conhecidos para aprendizagem em modelos conexionistas e focam-se apenas os aspectos estritamente relacionados com a sua adaptação a problemas do controlo de sistemas.

1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista da teoria dos sistemas, um **sinal** é um elemento de um espaço de funções suficientemente rico para que possa dar conta da natureza e comportamento dos fenómenos físicos em estudo e um **sistema** é um operador desse espaço para si próprio como ilustra a figura 1.

Fig. 1 Representação de um sistema físico e sinais relacionados.

Os problemas de controlo consistem, regra geral, em determinar o sinal u a aplicar à entrada do sistema a controlar S de modo a que a sua saída y tenha um comportamento especificado *à priori*. A mais simples solução que se pode imaginar para este problema consiste em tomar u como saída de um outro sistema C, o controlador, que recebe como entrada r, a trajectória desejada para S (figura 2). Neste tipo de controlo, em cadeia aberta, o sistema C deve ser então o operador inverso de S.

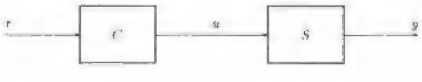


Fig. 2 Sistema de controlo em cadeia aberta.

A análise e síntese de sistemas são assim pedras fundamentais no estudo da teoria do controlo. O aspecto mais bem desenvolvido desta teoria trata apenas sistemas invariantes no tempo descritos por operadores lineares e baseia-se em técnicas consagradas como a álgebra linear, a teoria da variável complexa e das equações diferenciais lineares ordinárias. A exigência do conhecimento exacto do operador que descreve o sistema a controlar e a restrição de que este deve ser linear e invariante no tempo, mostram a insuficiência deste aspecto da teoria do controlo quando se lida com situações reais.

Na maioria das situações os sistemas em causa não são lineares, têm um comportamento variante no tempo e, além disso, o projecto do controlador tem de ser feito tendo em conta incertezas de vários tipos na modelização dos mesmos. No controlo, a invenção da **retroacção** é uma primeira resposta a estes problemas. Neste tipo de sistema de controlo, o controlador tem acessível não só a trajectória desejada mas também a que o sistema está realmente a percorrer, podendo então gerar u baseado na diferença entre estes dois sinais (figura 3).

Fig. 3 Sistema de controlo com retroacção.

Os primeiros estudos sobre estes sistemas realimentados remontam ao século XIX e foram feitos por

* Desde Janeiro de 1994, investigador no Instituto de Sistemas e Robótica.

Maxwell (a quem se deve o célebre modelo matemático da radiação electromagnética). No século XX, por volta dos anos 40, Wiener dedica-se também a uma série de trabalhos sobre estes sistemas e a sua estabilidade.

O controlador *C* é um sistema linear de parâmetros constantes e o seu projecto é feito supondo *S* também linear, ou pelo menos linearizável na zona de funcionamento de interesse, e invariante no tempo. Caso o sistema S tenha não linearidades sensíveis, originando linearizações diferentes quando muda de ponto de funcionamento, este tipo de controlo não é aplicável. Nestas situações, recorre-se ao controlo **adaptativo** que consiste na incorporação de um segundo nível de retroacção no sistema de controlo. Esta segunda malha consiste num mecanismo de aprendizagem que permite adaptar (ajustar de uma maneira óptima num certo sentido) os parâmetros do controlador como ilustra a figura 4. O controlador continua a ser um sistema linear e o mecanismo de adaptação dos seus parâmetros pode ser muito variado.

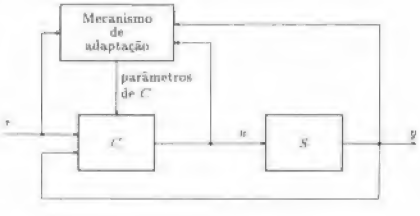


Fig. 4 Sistema de controlo adaptativo. O controlador C é um sistema de parâmetros variáveis.

Por uma questão de tractabilidade matemática, a investigação nas últimas décadas na área do controlo adaptativo, foi orientada no sentido de encontrar regras de adptação de parâmetros para controladores lineares que resultassem num sistema global estável ([Morse 80], [Goodwin 80]) e também no de determinar condições que assegurassem a robustez do sistema de controlo a diferentes tipos de perturbações. Os resultados que se obtêm com este tipo de cadeia de controlo revelam-se bastante bons quando está em causa um sistema linear ainda que variante no tempo (com um limite superior para a taxa de variação).

Em contraste, muito pouco trabalho teórico foi realizado no que diz respeito ao uso de modelos não-lineares para os sistemas controlador e controlado. Quando o sistema a controlar é caracterizado por grandes não-linearidades, esta opção parece ser a única admissível pois o sucesso de um controlador linear adaptativo é comprometido pelas sucessivas alterações do ponto de funcionamento do sistema (que originam linearizações completamente diferentes em curtos espaços de tempo). Note-se que esta é sempre a situação em que se cai quando se consideram modelos realistas dos sistemas a controlar (incluindo, por exemplo, no caso de sistemas mecânicos, folgas, atrito, não rigidez das diversas partes, etc.). A pouca teoria existente para guiar a análise e síntese de sistemas não-lineares tem limitado a utilização destes no controlo.

O recente desenvolvimento da área das **redes neuronais**, tem motivado a sua aplicação em sistemas de controlo. Estas, tendo grandes potencialidades para fazer mapeamentos não-lineares, são sistemas que podem "aprender" através de exemplos em vez de terem que ser totalmente sintetizados (figura 5). De facto, as redes neuronais têm-se revelado particularmente hábeis a lidar com sistemas e sinais reais, tomando em conta diversos aspectos de difícil modelização.

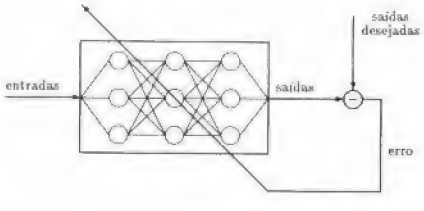


Fig. 5 A aprendizagem de uma rede neuronal.

Embora o estudo da utilização destes modelos conexionistas em sistemas de controlo comece agora a ser feito como uma extensão das técnicas conhecidas do controlo linear adaptativo [Narendra 90], a maioria das aplicações desenvolvi-

das, são restritas a problemas específicos e usam linguagens próprias dos seus autores. A robótica é o campo que tem concentrado a maior parte do esforço dos investigadores que se têm dedicado ao uso de redes neuronais no controlo automático de sistemas [Krose 91]. Mais precisamente, as redes têm sido usadas para dirigir manipuladores mecânicos, do género do esquematizado na figura 6, que são sem dúvida a forma mais importante de "robot" industrial. É sobre este tipo de utilização que incide este trabalho.

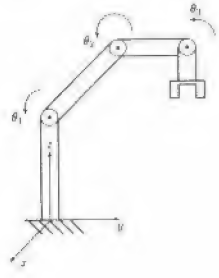


Fig. 6 Um manipulador robótico com três graus de liberdade: três juntas de rotação.

O estudo destes manipuladores robóticos envolve vários problemas dos quais se podem salientar os tratados exaustivamente em [Craig 86]:

- **Cinemática directa**. A cinemática é a ciência que estuda o movimento independentemente das forças que o causam. O estudo da cinemática de manipuladores envolve uma série de propriedades geométricas e relaciona-se com o cálculo da posição, velocidade, aceleração e outras derivadas de ordem superior das variáveis de posição. Um problema básico mas de grande importância é o da cinemática directa, que consiste na determinação da posição e orientação do efector-terminal do manipulador, dado um conjunto de ângulos nas juntas. Este problema é muitas vezes referido como o da mudança de representação da posição do manipulador do espaço-junta para o espaço-cartesiano.
- **Cinemática inversa**. Este é o problema inverso do anterior: calcular os possíveis conjuntos de ângulos nas juntas a usar para obter dada posição e orientação do efector-terminal do manipulador. A cinemática inversa não é um problema tão simples como o da cinemática directa. Uma vez que as equações da cinemática são não-lineares, a sua solução é muitas vezes impossível de determinar analiticamente. A existência de solução e as soluções múltiplas são também questões que se levantam devido à natureza das equações (a existência ou não de uma solução cinemática define o espaço de trabalho do manipulador).
- **Dinâmica**. Em dinâmica estuda-se o movimento como consequência da aplicação de forças sobre corpos. Para conduzir um manipulador desde o repouso inicial, fazendo o efector-terminal percorrer uma dada trajectória e chegando ao repouso final, um complicado conjunto de binários tem que ser aplicado nos actuadores das juntas do "robot". A forma destas funções de binário depende das características espaciais e temporais da trajectória, das características do manipulador (massa e dimensões dos troços, atrito nas juntas, etc.) e da carga transportada no efector-terminal.
- **Planeamento de trajectórias**. Uma maneira comum de fazer um manipulador mover-se de um ponto para outro de maneira suave é especificar para cada junta em movimento descrito por uma função suave do tempo. A maneira de calcular essas funções de movimento para as juntas, dados os pontos inicial e final (e possivelmente alguns intermédios) desejados para o efector-terminal é o problema do planeamento de trajectórias.

A maioria dos sistemas neuronais de controlo de "robots" propostos até agora incluem apenas a resolução do problema da cinemática inversa e deixam ao cuidado de métodos tradicionais o problema da dinâmica como referem [Pearlmutter 88] e [Krose 91]. Este tipo de sistemas de controlo é tratado na segunda parte deste trabalho.

Na terceira parte do texto são estudados os sistemas que contemplam já o problema do controlo dinâmico. Esta é a estruturação que nos pareceu mais lógico fazer devido à clara diferença de natureza dos problemas tratados.

As conclusões que se podem tirar desta pesquisa bibliográfica efectuada e as possíveis direcções futuras de trabalho nesta área são o tema da última parte do artigo.

2. CINEMATICA

Os problemas de controlo cinemático que surgem no campo da robótica resumem-se, quase exclusivamente, à determinação da cinemática inversa de manipuladores. É um problema estático (que não envolve dinâmica) e que consiste na inversão de um mapeamento não-linear conhecido.

O esquema da figura 2 pode ser usado para ilustrar a operação de um controlador cinemático: *S* representa o mapeamento não-linear dado pela cinemática directa do manipulador em causa e *C* é o controlador que tem por função "calcular" a cinemática inversa de *S* - deve determinar quais as posições das juntas do manipulador, *u*, que originam uma dada posição e orientação desejadas para o efector-terminal, *r*.

As potencialidades na síntese de mapeamentos não-lineares reveladas pelas redes neuronais e em particular pelos perceptrões multicamada, motivam o seu uso nestes sistemas de controlo estático. Nesta situação sugere-se a utilização de uma rede neuronal como sistema controlador cinemático como descreve a figura 7.

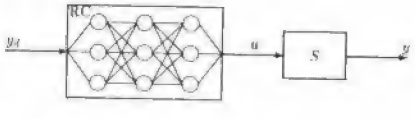


Fig. 7 Rede neuronal como controlador.

Pretende-se que a rede RC aprenda a gerar o sinal de entrada do sistema, *u*, que faça com que a saída deste, *y*, seja o mais próximo possível da desejada, y_d, fornecida a RC. O treino de uma rede para este fim não pode ser feito da maneira habitual ilustrada na figura 5 pois não é conhecido o erro cometido à saída da rede. Como são especificadas apenas as saídas desejadas para o sistema e não as saídas desejadas para a rede, a medida de erro disponível é a presente à saída do sistema, y_d-y.

Vários métodos foram sugeridos recentemente para a aprendizagem de uma rede neuronal nestas circunstâncias como é descrito sucintamente em [Tulunay 91]. Estes métodos, bem como referência a artigos que descrevem os seus resultados em diversas aplicações, são expostos ao longo deste capítulo.

Há ainda vários outros tipos de soluções na aplicação de métodos conexionistas no controlo cinemático que não são abordados neste texto. Em [Josin 88b] é utilizado um perceptrão multi-camada para fazer correcções a um método numérico clássico de cálculo da cinemática inversa de manipuladores, melhorando assim o seu desempenho. Em [Tsutsumi 87] e [Tsutsumi 88] é descrita a utilização de redes de Hopfield no controlo de posição de um manipulador planar cuja tarefa é fazer o efector-terminal atinjir uma posição final evitando obstáculos fixos dados. Em [Cruse 90] é tratado o problema da redundância que surge quando o manipulador em causa tem excessivos graus de liberdade para a tarefa a realizar.

2.1. Aprendizagem Supervisada

Uma das soluções mais simples em que se pode pensar para obviar ao problema descrito é usada em [Josin 88a]. Esta consiste em treinar a rede a imitar o funcionamento de um controlador clássico conhecido como ilustra a figura 8. A rede aprende minimizando o erro *e*, medido entre a sua saída, *u*, e a saída do controlador conhecido, u_d.

Josin utilizou um manipulador planar de dois troços (simulado). A posição do efector-terminal, (x,y), é facilmente relacionada com os valores dos ângulos das juntas, (θ_1,θ_2), e

esta relação, embora não seja injectiva, pode-se inverter se se considerar apenas uma das duas configurações possíveis em quase todo o espaço de trabalho. A relação entre (θ_1,θ_2) e (x,y) assim obtida pode

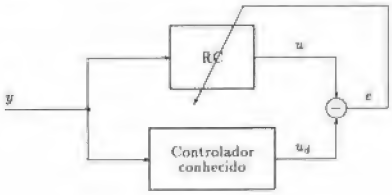


Fig. 8 Aprendizagem supervisada: RC imita um controlador conhecido.

ser ensinada a uma rede neuronal como descreve A figura 8. Josin usou um perceptrão multi-camada com duas entradas, 32 unidades numa camada escondida e duas unidades de saída. Treinando esta rede com 25 padrões igualmente distribuídos no espaço cartesiano, obteve bons resultados ainda que numa área restrita do espaço de trabalho. [Guez 88a] usa também o método descrito ao treinar um perceptrão com duas camadas escondidas de 10 unidades cada para determinar a cinemática inversa de manipuladores planares de 2 e 3 graus de liberdade. [Sobajic 88] descreve experiência semelhante com um "braço-robot" real. [ArteagaBravo 90] utiliza também a aprendizagem supervisada para treinar perceptrões para calcularem a cinemática directa (uma camada escondida) e inversa (duas camadas escondidas) de um manipulador de 2 troços.

Contudo, o uso prático deste tipo de treino para a rede controladora é muito limitado. A principal desvantagem consiste no facto de se ter que coinhecer *à priori* a cinemática inversa. Assim, a única vantagem em usar a rede face a fazer os cálculos directamente é a da eficiência e acontece nos casos em que a cinemática é muito complexa exigindo que se recorra a morosos métodos numéricos para determinar a sua solução.

Há muito mais interesse em procurar uma solução em que a rede aprenda através da sua própria experiência com o sistema, com os erros que a sua acção sobre ele possa provocar. Estes tipos de soluções, geralmente designados por "self-supervised", são apresentados nas subsecções seguintes.

2.2. Aprendizagem Generalizada

Como sugere a figura 7, a rede controladora deve aprender a fazer o mapeamento inverso do sistema a controlar. Assim, quando não se sabe a cinemática inversa, a maneira mais simples de obter os pares *entrada – saída desejada* necessários para o treino da rede é usar o próprio sistema para os gerar.

Exitando o sistema S com diversas entradas, u_d, obtêm-se saídas, y. Estas são fornecidas como entradas para a rede RC tendo como saídas desejadas os valores u_d usados (ver figura 9).

A aprendizagem evoluirá no sentido de minimizar o erro $\tilde{e}$, aproximando então RC do operador inverso de S.

A limitação deste método prende-se com o facto de não ser possível, na maior parte dos casos, treinar a rede nas zonas de funcionamento de interesse. Isto acontece visto que não se sabe que valores de u_d usar para obter os y nas regiões em que a rede será usada depois em funcionamento. O sucesso deste método é assim muito dependente da escolha das entradas u_d e da capacidade de generalização da rede.

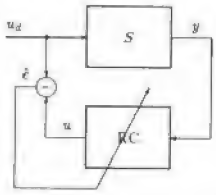


Fig. 9 Aprendizagem generalizada. RC é treinada para ser o operador inverso de S.

Este problema agrava-se quando o sistema S não é globalmente invertível. [Demers 92] usa a aprendizagem generalizada para resolver problemas de controlo cinemático de manipuladores mas divide primeiro o espaço de trabalho em zonas onde S é localmente invertível.

TÉCNICA n.º 3 DEZ 94

2.3. Aprendizagem Especializada

Para que o treino da rede controladora seja feito nas regiões onde futuramente tenha que trabalhar, é preciso ter um método que nos permita escolher livremente quais as entradas a fornecer a RC durante a fase de aprendizagem. A interacção de RC com o sistema S tem que ser então, também durante o treino, a descrita na figura 7. Afim de que se processe a aprendizagem com este tipo de interacção, é preciso ter um meio de "transformar" o erro medido à saída do sistema, no erro à saída da rede.

O modo como se implementa esta aprendizagem caso se conheça o jacobiano do sistema *S*, está representado na figura 10.

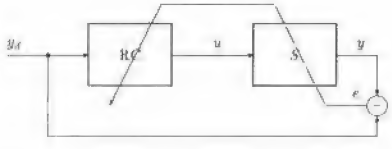


Fig. 10 Aprendizagem especializada. É necessário conhecer o jacobiano de S para obter a informação de treino para RC.

O erro que aqui orienta o treino é justamente a diferença entre a saída desejada para o sistema *S* e a que realmente se obtem por acção da rede RC. A maneira de implementar um "gradient descent" nesta função de erro que não é medida à saída da rede, consiste em utilizar o conhecimento do jacobiano de S para fazer uma retropropagação do erro *e* que origine a sua minimização.

Este tipo de minimização numérica executado durante o treino, consiste em fazer deslocações no espaço dos pesos de RC no sentido de maior decrescimento de *e*, dado pelo simétrico do seu gradiente em ordem aos pesos. A actualização que cada peso p da rede da rede deve sofrer na fase de aprendizagem é então:

$$p(n+1) = p(n) + \Delta p(n),\ \Delta p(n) = -\eta \frac{\partial e}{\partial p}(n),\quad \eta > 0$$

Sendo $\tilde{e} = u - u_d$ onde ud é o valor que a rede devia gerar para se obter $y = y_d$ (ou seja $S(u_d) = y_d$), tem-se:

$$\frac{\partial e}{\partial p} = \frac{\partial e}{\partial \tilde{e}}\frac{\partial \tilde{e}}{\partial p} = \frac{\partial e}{\partial \tilde{e}}\frac{\partial \tilde{e}}{\partial p} = \frac{\partial e}{\partial u}\frac{\partial \tilde{e}}{\partial p} \quad [1]$$

Logo conhecendo o jacobiano de *S*, $J(u) = \frac{\partial y}{\partial u}$, pode-se ajustar os pesos de RC de modo a executar um "gradient descent" em *e* pois, como mostra [Rumelhart 86], $\frac{\partial \tilde{e}}{\partial p}$ calcula-se pelo algoritmo da "back-propagation". O jacobiano faz então a "transformação" que se pretendia: do erro à saída do sistema para o erro no sinal de controlo.

Este método de treino exige o conhecimento das derivadas da função $y = S(u)$. Em [Psaltis 87] é sugerido um procedimento para que a aprendizagem possa ainda ser feita nas situações em que o jacobiano não é conhecido *à priori*. A ideia apresentada consiste em estimar continuamente o jacobiano do sistema *S* através de:

$$\frac{\partial y_i}{\partial u_j} = \frac{S_i(u + \delta_{uj} I_j) - S_i(u)}{\delta_{uj}} \quad [2]$$

Os vários δ_{uj} têm que ser escolhidos consoante o sistema a controlar, a sua zona de funcionamento e a entrada u_j e saída y_i em questão. Este tipo de estimação dá origem a erros que, dependendo de sistema para sistema, podem ser muito grandes.

---

[1] Para maior simplicidade de notação omitiu-se a dependência de *n* nestas expressões. Note-se também que as derivadas parciais indicadas não são quantidades escalares visto que *u*, *y*, *e* e $\tilde{e}$ são vectores. Assim, não se explicita na expressão que:

- $\frac{\partial \tilde{e}}{\partial p}$ e $\frac{\partial e}{\partial p}$ são vectores de dimensões dadas pelo número de entradas e saídas de *S*.
- $\frac{\partial e}{\partial \tilde{e}}$ é uma matriz com dimensões de acordo com as dos vectores referidos.

[2] I_j é um vector de dimensão igual ao número de entradas de *S*, com a j-ésima coordenada de valor unitário e todas as outras nulas.

BIBLIOTECA I.S.T.

[Psaltis 88] descreve a aplicação das aprendizagens generalizada e especializada num problema simples de controlo cinemático em que o sistema a controlar é uma transformação de coordenadas polares para rectangulares. Nesta experiência RC era um perceptrão de 2 camadas com 10 unidades na camada escondida e os melhores resultados foram obtidos quando se fez primeiro uma aprendizagem generalizada e depois, em zonas mais restritas do espaço cartesiano, a aprendizagem especializada. [Tanaka 91] resolve a cinemática inversa de um manipulador planar de 3 juntas usando uma rede neuronal cujo treino é feito de maneira semelhante à descrita – através do conhecimento do jacobiano da transformação directa. [Werntges 90] sugere um método empírico alternativo para transformar o erro e no erro $\tilde{e}$ e aplica-o à resolução da cinemática inversa de um manipulador planar de 2 graus de liberdade obtendo resultados piores do que quando usa o jacobiano de S.

2.4. Com uma Rede Neuronal a Simular o Sistema a Controlar

Neste subcapítulo expõe-se um método que evita os possíveis erros na estimação do jacobiano do sistema a controlar.

Recordemos que o problema de que estamos em presença consiste em obter a informação necessária para o treino da rede controladora pelos métodos conhecidos, o erro à sua saída, uma vez que dispômos apenas do erro à saída do sistema controlado. Como refere [Barto 90], este problema é análogo ao de obter informação de treino para uma unidade escondida de um perceptrão multi-camada (ver figura 11).

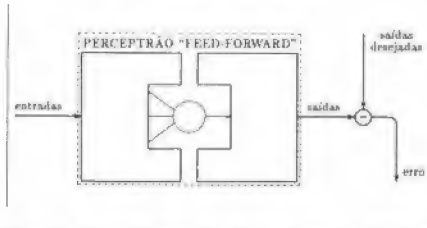


Fig. 11 O problema de treinar uma unidade escondida: como culpá-la pelos erros medidos à saída da rede?

Para qualquer unidade escondida, a porção de rede interposta entre ela e a saída da rede faz o papel do sistema S na figura 7 (numa rede "feed-forward", cada unidade está a "controlar" as que se posicionam à sua frente). Os métodos que se aplicam para determinar o comportamento pretendido para as unidades escondidas podem então também ser aplicados na determinação do comportamento desejado na nossa rede RC.

Para o problema ilustrado na figura 11, a solução é encontrada pelo algoritmo da "back-propagation" pois o "sistema a controlar" é, também ele, uma rede neuronal. A analogia entre este problema e o que nos interessa, e o facto de desconhecermos o sistema a controlar, sugere então que utilizemos no treino da rede controladora, uma rede auxiliar que simule o sistema (método proposto em [Jordan 88] e descrito também em [Kawato 90]).

O treino de uma rede RS para aprender o comportamento do sistema S pode ser feito utilizando o próprio sistema, através da aplicação directa de um algoritmo de "back-propagation" como mostra a figura 12 ([Farotimi 90] e [Sudharsanan 91] sugerem métodos para identificação de mapeamentos não-lineares usando redes neuronais dinâmicas).

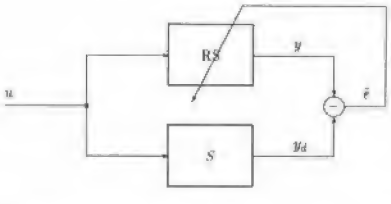


Fig. 12 O treino da rede RS para simular o sistema a controlar.

Uma vez treinada a rede RS, pode-se proceder ao treino da rede controladora RC da forma sugerida pelo método de aprendizagem para as unidades escondidas. O processo de aprendizagem é ilustrado na figura 13 e consiste na aplicação do algoritmo da "back-propagation" à rede formada pela ligação de RC com RS, tendo o cuidado de não alterar os pesos de RS. A propagação do erro e através da rede RS

TÉCNICA, nº 3 DEZ. 94

dá conta da estimação do jacobiano de S utilizado no método descrito na subsecção anterior.

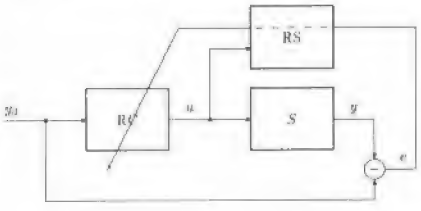


Fig. 13 A aprendizagem da rede controladora RC. O erro e é propagado através da rede RS previamente treinada.

O treino da rede RS levanta o mesmo problema que o treino de RC pelo método da aprendizagem generalizada - o de não ser possível fazer com que o treino ocorra nas regiões de interesse. Neste caso as consequências de um treino pior da rede em questão são menores pois RS só vai ser utilizada para determinar a direcção dos passos no espaço dos pesos de RC (um erro na determinação da direcção ideal para os passos, desde que não seja muito elevado, vai fazer só com que a aprendizagem de RC seja mais lenta). O treino de RC já pode ser feito nas regiões de interesse pois, como sugere a figura 13, os padrões usados podem ser escolhidos livremente e portanto ser representativos das situções que a rede vai encontrar quando em funcionamento depois de treinada.

[Elsley 88] sugere o uso de uma rede para estimar o jacobiano de uma transformação não-linear e utiliza-a para melhorar o desempenho de controladores cinemáticos tradicionais.

2.5. Aprendizagem Indirecta

Apresenta-se em seguida outro método de aprendizagem para solucionar o problema encontrado na subsecção **2.2**: como treinar RC nas regiões em que será depois utilizada para controlar S (figura 9).

Como a dificuldade é não se saber as entradas u_d a fornecer a S durante o treino, podemos pensar em usar a própria rede RC que está a ser treinada para os gerar. Uma solução para resolver o problema é descrita na figura 14.

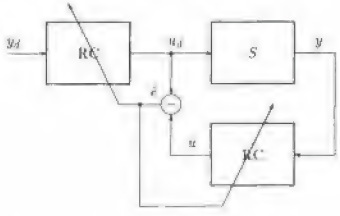


Figura 14: Aprendizagem indirecta. A própria rede RC é usada para gerar os padrões de treino.

A aprendizagem evoluirá no sentido de minimizar $\tilde{e} = u - u_d$ Como o erro que pretendemos ver mínimo é $e = y - y_d$ e a minimização deste ($y \approx y_d$) implica a minimização de $\tilde{e}$ ($u \approx u_d$), podemos então pensar que este método de treino nos conduzirá ao resultado pretendido.

A limitação deste método prende-se com o facto da minimização de $\tilde{e}$ não implicar a minimização de e. Como nota [Psaltis 87], a rede RC pode convergir para um sistema que apresente uma saída constante, U, para qualquer entrada. Neste caso tem-se, para qualquer entrada y_d, $u_d = U$, $y = S(U) = Y$, $u = U$ e então $\tilde{e} = U - U$ é nulo mas $e = Y - y_d$ não o é.

Este método não é no entanto totalmente desprovido de interesse pois, como se descreve em [Aguiar 90], pode ser usado conjuntamente com outros para melhorar os resultados nas trajectórias em que se pretende que o sistema S actue. Isto consegue-se utilizando este tipo de aprendizagem indirecta numa rede RC previamente treinada, ainda que em regiões mais gerais, por um dos métodos apresentados anteriormente.

Esta aprendizagem indirecta é descrita em [Elsey 88] como sendo uma das soluções para o treino de redes neuronais para controlo cinemático de manipuladores robóticos em alternativa às que requerem o conhecimento prévio do controlador desejado.

3. DINÂMICA

Como refere [Pearlmutter 88], os algoritmos comuns de aprendizagem para redes neuronais podem ser

pensados como caixas negras mágicas. Primeiro mostra-se à caixa negra uma série de padrões e a classificação correcta de cada um deles, depois de algum tempo, a caixa extrai a estrutura interna dos padrões aprendendo a produzir a saída pretendida para qualquer padrão de entrada. O conjunto de padrões não tem qualquer estrutura temporal e a caixa negra não tem memória: as respostas à entrada no instante actual não dependem de entradas em instantes anteriores.

Em contraste, no controlo de sistemas dinâmicos, um vector de dados de sensores é continuamente observado e um vector de sinais de controlo tem que ser continuamente gerado. O estado do sistema não é em geral completamente conhecido com a leitura dos sensores num dado instante; o estado pode ser inferido através da observação dos dados dos sensores por um período de tempo (figura 15). O sistema pode ter constantes de tempo de diversas ordens de grandeza e os sinais de controlo não têm necessariamente um efeito imediato. Quando se treina um sistema para a tarefa do controlo dinâmico, é preciso ter em conta que o que se procura são os sinais de controlo que originem uma dada **trajectória** para os sinais dos sensores.

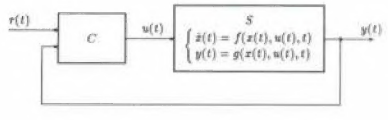


Fig. 15 O controlo de um sistema dinâmico: um problema com estrutura temporal.

O facto das técnicas mais comuns para aprendizagem em redes neuronais terem a referida natureza estática justifica que grande parte do trabalho dos investigadores que se dedicaram à sua aplicação ao controlo e à robótica tenha sido orientado para a resolução dos problemas de cinemática apresentados no capítulo anterior. Neste capítulo apresentam-se algumas das soluções até agora propostas para a integração de modelos conexionistas no controlo de sistemas dinâmicos não-lineares.

Uma classe de métodos de treino de redes neuronais que procuram resolver o carácter temporal deste problema é o conhecido por "Reinforcement Learning" [Werbos 90]. Estes métodos baseiam-se no uso de um sistema auxiliar, muitas vezes também uma rede neuronal, referido como "Adaptive Critic Element". O ACE, baseado no comportamento que vai observando do sistema a controlar, fornece uma indicação de desempenho que é usada no treino da rede controladora. A indicação de desempenho dada pelo ACE é particularmente importante em problemas em que o efeito do sinal de controlo só é visível para o controlador muito tempo depois daquele ter sido aplicado. Isto acontece no conhecido problema de equilibrar um pêndulo invertido numa plataforma móvel; a utilização do "Reinforcement Learning" na resolução deste problema é descrita em [Anderson 87], [Barto 88] e [Rosen 91][3] . Embora este tipo de métodos comece já a ser tratado com alguma generalidade ([Schmidhuber 90a], [Schmidhuber 90c] e [Thrun 91]), a sua aplicação tem sido exclusivamente dedicada a problemas da área da programação dinâmica[4] , pelo que não será objecto da descrição feita nos subcapítulos seguintes.

[3] Em qualquer destes trabalhos o controlador tem acessíveis as posições e velocidades do pêndulo e da plataforma e apenas uma informação de punição quando o pêndulo cai ou a plataforma se desloca para fora de certos limites estabelecidos *à priori*.

[4] Programação Dinâmica é a área da Teoria do Controlo Óptimo que trata os problemas de minimização de uma função de custo através de um algoritmo de decisão sequencial. Normalmente a função de custo é tal que a decisão tomada num dado instante só tem efeito instantes de tempo depois (jogos de estratégia como o Xadrez e as Damas são exemplos de problemas de decisão sequencial).

3.1. Redes Neuronais Integradas em Sistemas Clássicos de Controlo.

Uma das utilizações mais frequentes de redes neuronais em sistemas de controlo dinâmico consiste numa interacção com controladores convencionais. Normalmente as redes são usada para estimar os parâmetros *óptimos* a usar num controlador consoante o estado do sistema a controlar. São alternativas aos métodos clássicos de controlo adaptativo e deixam os referidos problemas de natureza temporal ao cuidado de controladores já muito bem estudados.

O esquema da figura 16 representa este tipo de utilização para as redes. A rede estimadora RE fornece os parâmetros para o controlador *C* consoante o ponto de funcionamento do sistema *S*. Em muitas aplicações, além de $u(t)$ e $y(t)$, RE recebe como entrada outras variáveis que lhe permitem estimar correctamente o estado de *S*.

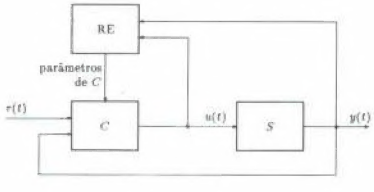


Fig. 16 Alternativa aos métodos clássicos de controlo adaptativo: uma rede neuronal determina os parâmetros do controlador.

O treino desta rede RE é feito de maneira supervisada exigindo-se então que se saiba *à priori* quais os parâmetros a usar no controlador para diversas situações de funcionamento do sistema. Esta é a grande limitação deste tipo de arquitectura e faz com que as suas vantagens face aos outros métodos de controlo adaptativo sejam "apenas" as que se relacionam com a velocidade de determinação dos parâmetros para o controlador [5].

Em [Guez 87] e [Guez 88b] é usada a arquitectura descrita para controlar um manipulador com um só grau de liberdade. Utiliza-se um controlador PD [6] e uma rede neuronal dinâmica para determinar os seus parâmetros. As variáveis de estado de RE correspondem aos parâmetros de *C* e a topologia dos estados estáveis de RE é determinada de modo a que estes correspondam aos valores desejados para os parâmetros de *C* (são conhecidos algoritmos para sintetizar redes desta maneira). No caso deste trabalho, os parâmetros desejados para *C* são determinados impondo a posição dos pólos da função de transferência do sistema em cadeia fechada (admitindo no seu cálculo a dinâmica de *S* substituída pela sua linearização). [Kumar 90] faz utilização semelhante das redes neuronais para colocação arbitrária de pólos. [Leahy 91] e [Karakasoglu 91] utilizam redes neuronais para estimar características de manipuladores robóticos (fricção, inércia, carga transportada, tec.) que depois fornecem a controladores desenhados da forma clássica através do conhecimento da forma geral da dinâmica dos manipuladores.

Outro tipo de utilização de redes neuronais integradas em sistemas de controlo clássicos é sugerida em [Miyamoto 88] e ilustrada na figura 17. Consiste em gerar o sinal de controlo como soma de duas parcelas: uma proveniente de um controlador convencional de "feed-back", *C*, outra proveniente de uma rede a funcionar como controlador "feed-forward", RC. O treino desta rede é

[5] Pode ser importante que o tempo de determinação dos parâmetros correctos seja independente do número de parâmetros a estimar. Isto não acontece nos métodos clássicos de controlo adaptativo mas é possível com uma rede neuronal a estimar os parâmetros.

[6] Proporcional-Diferencial é a designação e um controlador clássico em que o sinal de controlo é encontrado como combinação linear do sinal de erro (entre a saída desejada e a que realmente acontece no sistema a controlar) e da sua derivada: $u(t) = - K_1 e(t) - K_2 \dot{e}(t)$.

feito com base no sinal de saída do controlador de "feed-back" pois, quanto melhor fôr o desempenho da rede (mais próxima esta estiver da dinâmica inversa do sistema), menor deve ser este sinal.

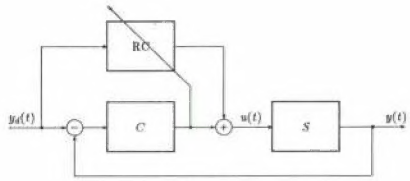


Fig. 17 Um controlador de "feed-back" convencional e uma rede neuronal como controlador "feed-forward".

[Hosogi 90] faz o controlo de um manipulador planar de dois troços por este método mas tendo acesso não só às posições mas também às velocidades de cada junta. [Kawato 90] faz o estudo da estabilidade dos métodos de aprendizagem usados neste tipo de arquitectura. [Katayama 91] faz controlo de posição e força de manipuladores por um método semelhante ao apresentado: além do controlador clássico, usa duas redes neuronais como controladores "feed-forward" – uma para o controlo de posição e outra para o controlo de força.

Diversas outras maneiras de integrar modelos conexionistas em sistemas clássicos de controlo foram sugeridas na literatura, como por exemplo em [Iiguni 91] onde é usada uma rede neuronal para melhorar a robustez de um LOR [7], compensando as não-linearidades e incertezas presentes no sistema a controlar.

3.2. Uma Solução Conexionista Simples: o CMAC

Neste subcapítulo introduz-se o CMAC ("Cerebellar Model Arithmetic Computer"), uma solução para o controlo de sistemas dinâmicos não-lineares descrita por exemplo em [Kraft III 90] mas conhecida já desde a década de 70 [8].

Para descrever o CMAC, considere-se o sistema a controlar S, de 1.ª ordem, caracterizado pela seguinte equação às diferenças, depois de discretizado:

$$y(k+1) = f(y(k),u(k))$$

Esta equação, que reflecte o comportamento entrada-saída do sistema, pode ser vista de uma maneira alternativa de maior interesse do ponto de vista do controlo:

$$u(k) = g(y(k),y(k+1))$$ [9]

A representação gráfica de g é uma superfície que fornece o controlo, $u(k)$, a aplicar ao sistema consoante a saída actual, $y(k)$, e a pretendida no instante seguinta, $y(k+1)$. Caso o sistema S seja linear, esta superfície degenera num plano.

A ideia básica do CMAC é gerar uma aproximação desta superfície a partir de dados de entrada e saída do sistema e usá-la depois no controlo do mesmo como ilustra a figura 18.

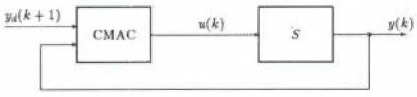


Fig. 18 "Cerebellar Model Arithmetic Computer".

Se a forma da dinâmica do sistema, bem como todos os seus parâmetros, forem conhecidos, a superfície pode ser calculada *à priori* e guardada em memória. Dadas as posições actual e seguinte desejada, i.e., o enedereço de memória, o sinal de controlo a aplicar pode ser encontrado por uma simples con-

[7] "Linear Optimal Regulator" é o controlador que se obtem na Teoria do Controlo Óptimo para sistemas lineares e invariantes no tempo de parâmetros conhecidos *à priori*.

[8] Este modelo de controlo é baseado no proposto em [Albus 72] para a modelização do controlo do movimento dos músculos ("Cerebellar Model Articulation Control").

[9] O domínio de g é restringido ao subconjunto de R^2 em que a inversão feita é possível. Tem que se ter ainda em conta o problema dos pontos do domínio em que mais que uma solução é possível.

sulta do valor guardado nesse endereço.

O problema mais interessante sucede quando os parâmetros do sistema são desconhecidos e a superfície tem que ser aprendida em tempo real a partir de dados de entrada e saída do sistema. Há diversas maneiras de proceder a uma aprendizagem deste tipo. Uma relativamente simples e robusta, representada na figura 19, consiste em actualizar iterativamente os valores guardados em memória que representam a superfície a identificar, através da lei

$$M_{ij}(k+1) = M_{ij}(k) + \eta[u(k) - M_{ij}(k)]$$

onde $M_{ij}(k)$ representa o valor presente da posição de memória em questão (determinado por $y(k)$ e $y(k+1)$), $M_{ij}(k+1)$ é o valor actualizado, $u(k)$ é a entrada do sistema no instante n e η é um parâmetro de aprendizagem que toma um valor positivo entre zero e um.

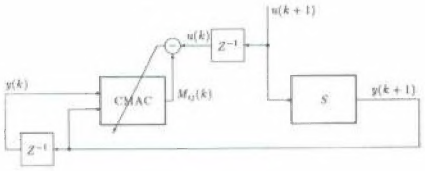


Fig. 19 A aprendizagem do CMAC.

Se $M_{ij}(k)$ é maior que $u(k)$, é corrigido através da subtração de uma quantidade proporcional ao erro; se é menor, a correção é no sentido contrário. Se $M_{ij}(k)$ é igual a $u(k)$, o seu valor não é alterado [10]

O CMAC tem muitas limitações e só é aplicável para sistemas simples, de ordem baixa e que funcionem numa zona limitada do espaço de trabalho. Isto sob pena de ser necessário usar grande quantidade de memória e ser moroso fazer o treino de tal controlador.

[Kraft III 90] faz um estudo comparativo deste método de controlo com dois algoritmos conhecidos do controlo adaptativo – o STR [11] e o MRAC [12]. Usa como teste dois sistemas simples de 1.ª ordem, um linear, outro não-linear. A conclusão principal apresentada é que o CMAC tem uma taxa de convergência mais lenta do que os outros dois algoritmos mas apresenta um desempenho muito melhor no que diz respeito ao controlo do sistema não-linear. [Carter 90] usa o CMAC numa aplicação diferente: integrado numa cadeia de controlo inteligente.

3.3. Perceptrões Multi-camada. O Problema do Comportamento Temporal

Nesta subsecção apresentam-se soluções mais gerais para o controlo de sistemas dinâmicos. Usam-se perceptrões multi-camada em arquitecturas semelhantes às descritas no capítulo **2** para o controlo cinemático, mas tendo em atenção a natureza marcadamente temporal do problema a resolver.

---

[10] Pelo algoritmo descrito, só é actualizada uma posição de memória por ciclo de relógio. Não há transferência de informação para as posições de memória adjacentes o que pode ser uma desvantagem muito grande em termos de capacidade de generalização do CMAC. Para acelerar a aprendizagem e aumentar a distribuição de informação, pode-se actualizar de cada vez um grupo de posições que esteja na vizinhança da seleccionada. Este tipo de generalização pressupõe um certo "bom comportamento" do sistema a controlar, no sentido em que estados próximos impliquem sinais de controlo próximos.

[11] O "Self-Turning Regulator" é essencialmente um controlador clássico de "feedback" com parâmetros ajustáveis. Um algoritmo de identificação do tipo mínimos quadrados é usado para identificar o sistema a controlar. Os parâmetros do controlador são ajustados de acordo com esta estimativa.

[12] O "Model Reference Adaptive Controller" é desenhado de forma a que a saída do sistema a controlar siga a de um modelo de referência especificado à priori. Há maneiras de ajustar dinamicamente os parâmetros de tal controlador de modo a que o sistema global em cadeia fechada seja assimptoticamente estável e portanto que o erro (entre as saídas do sistema a controlar e do modelo de referência) tenda para zero.